

Université  
de Toulouse

# THÈSE

**En vue de l'obtention du  
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

**Délivré par :**  
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

**Discipline ou spécialité :**  
Micro-ondes, Electromagnétisme et Optoélectronique

---

**Présentée et soutenue par :**  
Bastien ROUCARIES

**le :** vendredi 27 novembre 2009

**Titre :**  
  
Contributions au contrôle non destructif des composites carbonés

---

**Ecole doctorale :**  
Génie Electrique, Electronique et Télécommunications (GEET)

**Unité de recherche :**  
LAPLACE

**Directeur(s) de Thèse :**  
Jacques DAVID

**Rapporteurs :**  
Georges ALQUIE  
Raymond QUERE

**Membre(s) du jury :**  
Georges ALQUIE, Président du jury  
Raymond CRAMPAGNE, Membre  
Olivier THUAL, Membre  
Tan-Phu VUONG, Membre

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Détections de défauts dans les matériaux en carbone</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Les matériaux composites</b>	<b>5</b>
2.1	Introduction aux matériaux composites . . . . .	5
2.2	Fabrication et composition des composites carbonés . . . . .	8
2.2.1	Les fibres de carbone . . . . .	8
2.2.2	Les résines . . . . .	10
2.2.3	Fabrication des composites laminaire . . . . .	10
2.2.4	Le nid d'abeille . . . . .	11
2.3	Endommagement des structures à base de carbone . . . . .	12
2.3.1	Les mécanismes à la base des défauts . . . . .	12
2.3.1.1	La rupture . . . . .	12
2.3.1.2	La délamination . . . . .	12
2.3.2	Les causes des défauts . . . . .	13
2.3.2.1	Les impacts . . . . .	13
2.3.2.2	La fatigue . . . . .	13
2.3.2.3	L'infiltration d'eau . . . . .	14
2.3.2.4	La foudre . . . . .	16
2.4	Incidents liés aux composites en aviation . . . . .	16
2.4.1	American Airlines 587 . . . . .	16
2.4.2	Air Transat 961 . . . . .	17
2.5	Les moyens d'inspection . . . . .	18
2.5.1	Les ultrasons . . . . .	18
2.5.2	La radiographie . . . . .	18
2.5.3	La thermographie . . . . .	19
2.5.4	L'inspection sous vide . . . . .	19
2.5.5	Le contrôle destructif . . . . .	20
2.6	Conclusion . . . . .	20
2.7	Bibliographie . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Méthodes de détection électriques</b>	<b>23</b>
3.1	Introduction . . . . .	23
3.2	Données électriques sur les fibres de carbone et les composites carbone . . . . .	24
3.2.1	Résultats concernant les composites en l'absence de contraintes . . . . .	24
3.2.2	Influence des contraintes sur les composites carbonés . . . . .	24
3.2.3	Conclusion . . . . .	25
3.3	État de l'art des différentes méthodes de mesures électriques sur des composites carbonés . . . . .	26
3.3.1	Les mesures résistives . . . . .	26
3.3.1.1	Introduction . . . . .	26
3.3.1.2	Quelques résultats expérimentaux . . . . .	26

3.3.2	Les méthodes dites potentielles . . . . .	29
3.3.3	Les méthodes à base de courants de Foucault . . . . .	29
3.3.3.1	Introduction . . . . .	29
3.3.3.2	Quelques exemples . . . . .	31
3.3.4	Traitement du signal et évaluation des dommages . . . . .	32
3.4	Introduction aux méthodes de mesure radiofréquences . . . . .	32
3.4.1	Propagation des ondes . . . . .	32
3.4.2	Quelques applications et exemples dans le domaine des matériaux . . . . .	33
3.5	Conclusion . . . . .	33
3.6	Bibliographie . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Trois nouvelles méthodes électriques</b>	<b>45</b>
4.1	Introduction . . . . .	46
4.2	Détection des défauts par une approche de type back-scattering . . . . .	46
4.2.1	Introduction . . . . .	46
4.2.2	Les mesures microondes de type espace libre . . . . .	46
4.2.2.1	Présentation de la mesure . . . . .	46
4.2.2.2	Les détails . . . . .	47
4.2.2.3	Lien entre les paramètres secondaires et l'endommagement . . . . .	48
4.2.2.4	Conclusion . . . . .	49
4.2.3	La mesure de type backscattering . . . . .	49
4.2.3.1	Le principe . . . . .	49
4.2.3.2	La modulation . . . . .	50
4.2.4	Résultats expérimentaux . . . . .	51
4.2.5	Perspectives . . . . .	53
4.2.5.1	Dans le domaine du contrôle de qualité à la fabrication . . . . .	53
4.2.5.2	Améliorations possibles . . . . .	53
4.2.6	Conclusion . . . . .	53
4.3	Détection du sens des fibres . . . . .	54
4.3.1	Problématique . . . . .	54
4.3.2	La solution technique . . . . .	54
4.3.2.1	État de l'art des méthodes planaires . . . . .	54
4.3.2.2	La méthode résonnante slot . . . . .	55
4.3.3	Simulation . . . . .	55
4.3.4	Mesure . . . . .	56
4.3.5	Conclusion et perspective . . . . .	56
4.4	Détection des impacts par une approche de mesure anisotrope . . . . .	56
4.4.1	Problématique . . . . .	56
4.4.2	Une mesure d'anisotropie . . . . .	58
4.4.3	Mesures . . . . .	60
4.4.4	Construction d'un impacteur . . . . .	60
4.4.5	Perspectives et conclusion . . . . .	63
4.5	Conclusion . . . . .	63
4.6	Bibliographie . . . . .	63
<b>II</b>	<b>Détection des liquides dans le composites alvéolaires</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Principes d'une nouvelle méthode multiphysique</b>	<b>69</b>
5.1	La détection de l'eau une tâche difficile . . . . .	69
5.2	Présentation de la solution innovante . . . . .	71
5.3	État de l'art des méthodes non destructives . . . . .	71
5.3.1	Les méthodes ultrasonores ou vibratoires . . . . .	73
5.3.2	Couplage électromagnétisme-mécanique vibratoire . . . . .	73
5.3.3	Non linéarités mécaniques et contrôle non destructif . . . . .	75
5.3.4	Conclusion . . . . .	75

5.4	Le RADAR Continuous wave . . . . .	76
5.4.1	Principe du radar . . . . .	76
5.4.2	Les applications . . . . .	76
5.4.2.1	Le RADAR routier . . . . .	76
5.4.2.2	Les RADAR de détection de mouvement . . . . .	76
5.4.3	Sensibilité du RADAR CW . . . . .	78
5.4.4	Éléments sur le bilan de liaison . . . . .	79
5.4.5	Conclusion . . . . .	80
5.5	Réponse fréquentielle du composite . . . . .	80
5.5.1	Théorie élastique classique . . . . .	81
5.5.2	Réponse non-linéaire d'un solide . . . . .	82
5.5.3	Cas de l'élasticité finie . . . . .	82
5.5.4	Phénomène hystérétique . . . . .	82
5.5.5	Non linéarité au niveau des contacts . . . . .	83
5.5.6	Conclusion . . . . .	83
5.6	Le dispositif d'étude . . . . .	83
5.7	Perspectives . . . . .	85
5.7.1	Électronique . . . . .	85
5.7.2	Mécanique . . . . .	85
5.8	Conclusion . . . . .	86
5.9	Bibliographie . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Instabilités paramétriques d'un matériau diphasique</b>	<b>93</b>
6.1	Introduction . . . . .	93
6.2	Vibration d'un réservoir : cas linéaire . . . . .	94
6.2.1	Introduction . . . . .	94
6.2.2	Modèle simplifié . . . . .	94
6.2.2.1	Le problème de Laplace . . . . .	94
6.2.2.2	Application à un cylindre . . . . .	96
6.2.2.3	Calcul des pertes . . . . .	97
6.2.2.4	Les limites . . . . .	99
6.2.3	Le modèle de KIDAMBI . . . . .	99
6.2.3.1	Le modèle physique . . . . .	99
6.2.3.2	Application à notre cas d'étude . . . . .	104
6.2.3.3	Conditions aux limites de type glissante . . . . .	104
6.2.3.4	Conclusion et perspectives . . . . .	106
6.3	Excitation paramétrique d'un fluide : les ondes de Faraday . . . . .	107
6.3.1	Introduction . . . . .	107
6.3.2	L'équation de Mathieu . . . . .	108
6.3.3	Étude au premier ordre . . . . .	108
6.3.3.1	Étude de l'équation de Mathieu classique . . . . .	108
6.3.3.2	Étude de l'influence de la dissipation . . . . .	110
6.3.4	Utilisation du modèle linéaire . . . . .	115
6.3.5	Vers un modèle plus complet . . . . .	116
6.4	Cas d'un réservoir entièrement rempli de fluide . . . . .	116
6.5	Simulation . . . . .	117
6.5.1	Simulation complète avec star-ccm+ . . . . .	118
6.5.2	Conclusion et perspectives . . . . .	118
6.6	Conclusion . . . . .	119
6.7	Bibliographie . . . . .	119

<b>7</b>	<b>Expérimentations</b>	<b>123</b>
7.1	Introduction . . . . .	123
7.2	Le RADAR . . . . .	123
7.2.1	Atténuation des ondes électromagnétique dans le carbone . . . . .	123
7.2.2	Test de sensibilité du radar . . . . .	125
7.2.3	Conclusion et améliorations . . . . .	125
7.3	Le système mécanique . . . . .	125
7.4	Le système hydraulique . . . . .	127
7.5	Le système de détection . . . . .	129
7.5.1	Expérimentations sur un tube cylindrique . . . . .	129
7.5.2	Expérimentation sur un modèle avec du carbone . . . . .	129
7.5.3	Conclusion et perspectives . . . . .	129
7.6	Conclusion . . . . .	131
<b>III</b>	<b>Conclusion et Annexes</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>135</b>
<b>A</b>	<b>Harmoniques cylindriques</b>	<b>137</b>
<b>B</b>	<b>L'impacteur</b>	<b>141</b>
<b>C</b>	<b>Calculs associés au problème hydraulique</b>	<b>149</b>
C.1	Calcul des expressions intervenant dans le problème aux valeurs propres la ligne triple étant fixe . . . . .	149
C.2	Calcul des expressions intervenant dans le problème aux valeurs propres condition aux limites glissantes . . . . .	150
<b>D</b>	<b>Publications</b>	<b>151</b>
D.1	Bibliographie . . . . .	151

# Chapitre 1

## Introduction

Les composites, en particulier les composites carbonés, ont révolutionné le domaine de l'aviation, permettant de faire des pièces plus résistantes, plus légères tout en améliorant les procédés d'assemblage et en diminuant les opérations de soudage ou de rivetage. Malgré des avantages indéniables par rapport à l'ancienne génération de matériaux (basée sur des alliages métalliques souvent à base d'aluminium), cette nouvelle génération n'est pas immune aux défauts. En particulier ces composites vieillissent, se fatiguent et sont soumis à des agressions extérieures comme par exemple des impacts aéro ou la foudre.

L'industrie aéronautique est en effet une grande utilisatrice des techniques de contrôle non destructif. La rupture d'une pièce en aviation ayant bien souvent des conséquences dramatiques tant humaines que matérielles, il est donc nécessaire de détecter au plus tôt ces défauts afin de réparer ou remplacer les pièces abîmées. Ainsi des techniques telles que les ultrasons, les courants de Foucault, la thermographie sont utilisées de manière courante dans le monde de l'aéronautique. Malheureusement ces méthodes, développées pour certaines depuis plus de cinquante ans, ont été spécialement conçues et spécifiées pour les matériaux métalliques et ne sont donc pas entièrement adaptées aux composites carbonés.

En outre, certains types de défauts comme par exemple l'infiltration d'eau sont spécifiques aux matériaux composites. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthodes satisfaisantes capables de les détecter.

Le travail que nous présentons dans cette thèse consiste donc à développer de nouvelles méthodes de détections adaptées à ces nouveaux matériaux composites à base de carbone.

Dans une première partie, je présenterai mon travail portant sur trois nouvelles méthodes de contrôle non destructifs de type radiofréquences. Cette partie se décompose en trois chapitres :

- Une introduction aux matériaux composites. Nous développerons leurs modes de fabrication, leurs modes de défauts et un historique de quelques accidents dus à des défaillances de ces composites.
- Un chapitre consacré aux méthodes électriques existantes, en particulier les méthodes basées sur la mesure de la résistance électrique. Nous présenterons aussi quelques résultats bibliographiques concernant les caractéristiques électriques des composites carbonés.
- Un chapitre présentant trois nouvelles méthodes de détections électromagnétiques. La première méthode est basée sur le principe du backscattering et les deux autres sur une mesure de l'anisotropie électrique.

Dans la deuxième partie, je présenterai mon travail portant sur la création et la mise au point d'un nouveau dispositif permettant de détecter l'eau dans les composites carbonés. Ce nouveau dispositif est basé sur la détection d'une onde mécanique particulière et a donné lieu à un brevet international qui est en cours de commercialisation auprès du groupe EADS. Cette partie se décompose en trois chapitres :

- Un premier chapitre détaillant le principe physique de ce dispositif. Cette partie est complétée par une étude de faisabilité du dispositif innovant.
- Un chapitre concernant le cœur du dispositif c'est à dire l'étude du dispositif non linéaire hydraulique basé sur les ondes de Faraday.

- Un chapitre expérimental, incluant les expérimentations correspondantes aux deux chapitres précédents.

Enfin nous concluons et nous ouvrons notre travail, en offrant des perspectives. En particulier, nous détaillerons les diverses pistes de recherches s'ouvrant à nous et l'évolution possible des dispositifs que nous avons mis au point.

Le travail présenté au sein de cette thèse a été réalisé au sein du laboratoire Laplace de Toulouse, laboratoire commun à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III) et à l'INPT-ENSEEIH, sous la direction du Professeur Jacques David.

Première partie

# Détections de défauts dans les matériaux en carbone





## Chapitre 2

# Les matériaux composites

### Table des matières

2.1	Introduction aux matériaux composites . . . . .	5
2.2	Fabrication et composition des composites carbonés . . . . .	8
2.2.1	Les fibres de carbone . . . . .	8
2.2.2	Les résines . . . . .	10
2.2.3	Fabrication des composites laminaire . . . . .	10
2.2.4	Le nid d'abeille . . . . .	11
2.3	Endommagement des structures à base de carbone . . . . .	12
2.3.1	Les mécanismes à la base des défauts . . . . .	12
2.3.1.1	La rupture . . . . .	12
2.3.1.2	La délamination . . . . .	12
2.3.2	Les causes des défauts . . . . .	13
2.3.2.1	Les impacts . . . . .	13
2.3.2.2	La fatigue . . . . .	13
2.3.2.3	L'infiltration d'eau . . . . .	14
2.3.2.4	La foudre . . . . .	16
2.4	Incidents liés aux composites en aviation . . . . .	16
2.4.1	American Airlines 587 . . . . .	16
2.4.2	Air Transat 961 . . . . .	17
2.5	Les moyens d'inspection . . . . .	18
2.5.1	Les ultrasons . . . . .	18
2.5.2	La radiographie . . . . .	18
2.5.3	La thermographie . . . . .	19
2.5.4	L'inspection sous vide . . . . .	19
2.5.5	Le contrôle destructif . . . . .	20
2.6	Conclusion . . . . .	20
2.7	Bibliographie . . . . .	20

### 2.1 Introduction aux matériaux composites

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés en aviation commerciale [1, 2]. Dans les vingt dernières années, la part des composites, qui était marginale, représente plus de 50% de la masse<sup>①</sup> des avions de nouvelle génération (voir la figure 2.1). Si l'on regarde le marché des petits avions, on s'aperçoit qu'il existe même des avions à structure entièrement composite comme par exemple le SR22-G3 de Cirrus. Cet avion est entièrement constitué de composites à l'exception du moteur et des fixations des diverses pièces. La tendance est donc aujourd'hui de remplacer une très grande partie des pièces métalliques par leur équivalent carbone. À titre

---

<sup>①</sup>Et encore plus en volume et en nombre de pièce car la densité de ces matériaux est très faible.

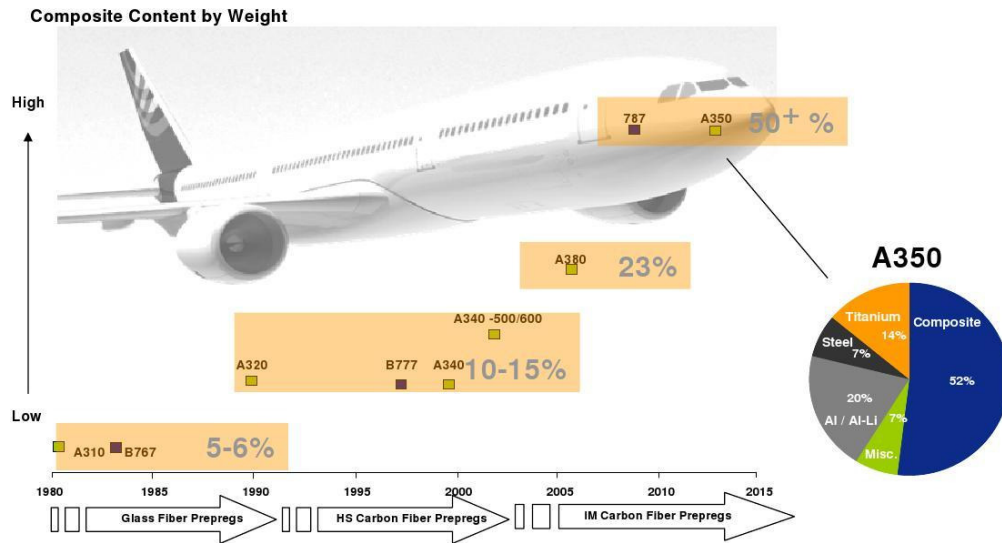


FIG. 2.1: Utilisation des composites en aviation : tendance et exemple de l'A350 [1].

d'exemple une grande partie des surfaces extérieures du Boeing 787 sera réalisée en composite (voir la figure 2.2).

Bien que le principal avantage des matériaux composites soit le gain de masse, qui permet à la fois des économies de carburant et une augmentation de la masse utile, ces matériaux possèdent d'autres avantages [3] :

- Une importante réduction du nombre de pièces principales et de pièces de jonction (rivets, boulons...). À titre d'exemple, l'emploi de composite pour la dérive verticale du Lockheed L-1011 a permis une réduction de 72% du nombre de pièces maîtresses et de 83% du nombre de pièces de jonction par rapport au même assemblage réalisé en alliage d'aluminium. Le gain en masse est lui plus modeste, de l'ordre de 25%.
- Une plus grande résistance à la fatigue et à la corrosion. À titre d'exemple il est nécessaire de réparer tout les 18 mois en moyenne les dégâts dus à la corrosion sur des hélicoptères évoluant en condition saline. Les pièces en composite étant très peu sensibles à la corrosion, ces réparations coûteuses sont donc totalement éliminées.
- Le fait que les pièces en composite puissent avoir une réponse mécanique anisotrope permet d'optimiser l'épaisseur des pièces, et diminuer ainsi la masse de manière plus sensible tout en améliorant les propriétés mécaniques.
- Une meilleure atténuation des vibrations. Les matériaux composites possèdent de plus grandes constantes d'amortissement vibratoire que leurs contreparties métalliques.

La grande diversité des contraintes auxquelles sont soumis ces composites et la variabilité des formes mécaniques à obtenir, se traduisent par une grande diversité de solutions. En effet, lorsque l'on parle des composites on entend un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles dans le but d'obtenir ou d'optimiser des propriétés mécaniques. Un matériau composite est par définition constitué :

- d'un renfort qui assure la tenue mécanique, donc l'essentiel des caractéristiques mécaniques
- d'une matrice qui est généralement une matière plastique, et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.

Le choix des renforts et des résines est assez vaste mais seuls quelques couples sont intéressants en pratique pour les applications de type aviation. Les plus courants sont :

- Les fibres de verre dans des résines thermoplastiques.
- Les fibres de carbone dans des résines thermoplastiques.
- Le GLARE qui est une superposition de feuilles de composite en fibre de verre et de minces feuilles en aluminium.

En plus de cette distinction sur la composition des composites, il convient de distinguer

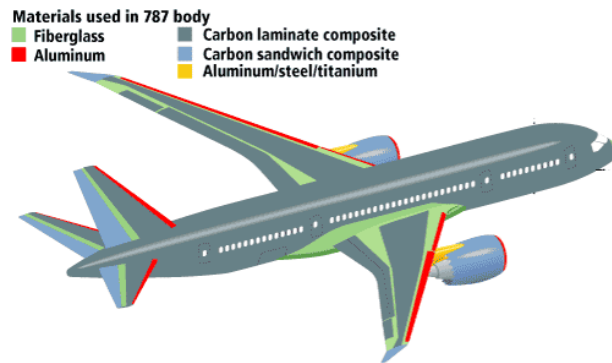


FIG. 2.2: Les composites dans un avion récent : le cas du 787 [2].



FIG. 2.3: Fuselage du 787 en carbone laminaire [4]

aussi le type de construction : les composites dits laminaires et les composites dits sandwichs. Les matériaux laminaires sont des matériaux plein composites. Un exemple est donné par la figure 2.3 dans lequel un composite laminaire remplace les tôles métalliques classiques. Les matériaux sandwichs sont constitués d'une structure alvéolaire en nid d'abeille (voir figure 2.4b) sur laquelle sont apposés des peaux en composite laminaire. Cette structure, basée sur le principe des poutres en H, permet d'augmenter la résistance en compression, tout en offrant un taux de vide de l'ordre de 95%. Les matériaux de type sandwichs sont utilisés couramment en aéronautique pour le remplissage des volumes creux comme les gouvernes ou les voilures, mais aussi de plus en plus dans l'industrie navale et automobile, ou dans des applications plus surprenantes comme la construction d'éoliennes.



(a) Structure en nid d'abeille ou NIDA[5]



(b) Pièce aéronautique en composite sandwich (collection personnelle)

FIG. 2.4: Matériaux composite de type sandwich

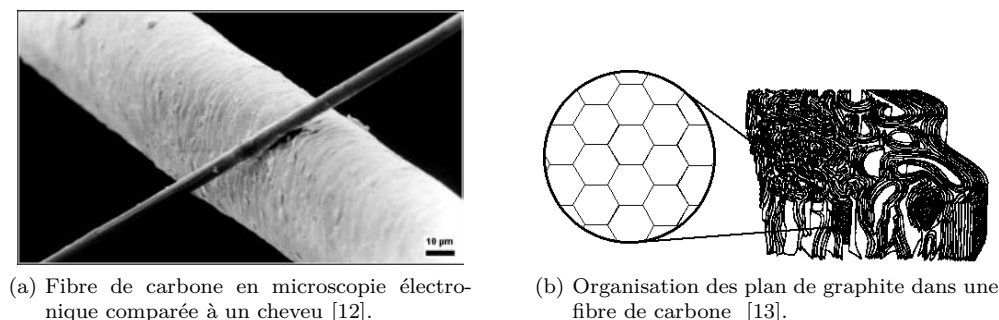


FIG. 2.5: La fibre de carbone

## 2.2 Fabrication et composition des composites carbonés

### 2.2.1 Les fibres de carbone

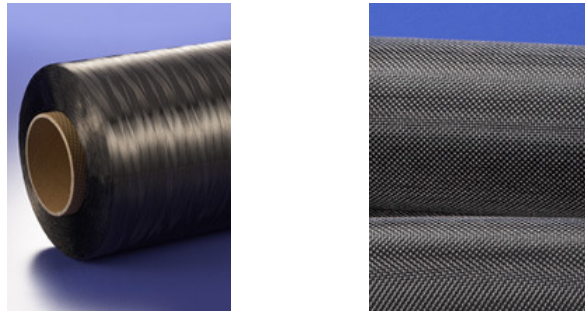
Les premières fibres de carbone ont été fabriquées pour la première fois par J. SWAN à partir de coton ou de papier carboné [6], afin de réaliser les premières lampes à incandescence [7]. Cette invention a été reprise par T. EDISON [8, 9] et a mené au succès commercial de l'éclairage électrique.

Pendant quelques années la fibre de carbone fut utilisée uniquement comme filament des lampes. En 1957, la société Barnebey-Cheney Company fabriqua de manière ponctuelle des filtres à base de fibres de carbone pour le filtrage de matériaux corrosifs à haute température. Malheureusement, ces fibres avaient de mauvaises caractéristiques mécaniques. L'ère moderne de la fibre de carbone commença réellement lorsque R. BACON, de la société Union Carbide, fabriqua en 1958 [10], les premières fibres de carbone à haute performance, possédant une résistance à la rupture de 20 GPa et un module de Young de 700 GPa, c'est-à-dire 5 à 6 fois supérieur aux caractéristiques des fibres d'acier pour une densité huit fois inférieure. Malheureusement, le coût de ces fibres fut estimé à 20 millions de dollars par kilogramme. La décennie suivante fut consacrée à faire baisser le coût de ce matériau.

A l'heure actuelle, les fibres de carbone sont fabriquées à partir de plusieurs précurseurs, en particulier le polyacrylonitrile (PAN), ou de la résine. Le processus de fabrication le plus courant consiste à étirer la fibre de PAN jusqu'à ce qu'elle atteigne un diamètre de 6 à 10  $\mu\text{m}$ , tout en l'oxydant à environ 200  $^{\circ}\text{C}$ . Durant cette oxydation, la fibre devient alors noire et sa structure change. Les atomes d'hydrogène disparaissent et sont remplacés par des atomes d'oxygène. L'étape suivante est la carbonisation, les fibres de carbone sont alors chauffées entre 1000 et 3000  $^{\circ}\text{C}$  en atmosphère neutre. Cette étape élimine les atomes d'oxygène et fabrique une fibre de carbone contenant entre 92% et 99% de carbone. La dernière étape consiste à enrober les fibres afin d'améliorer les caractéristiques d'adhérence de la fibre et de les protéger de l'oxydation [11]. Une image en microscopie électronique d'une fibre de carbone est donnée par la figure 2.5a.

Le carbone dans les fibres possède à l'échelle microscopique une structure ressemblant à celle du graphite. Cependant, à l'échelle mésoscopique, la fibre ne forme pas des cristaux comme le graphite mais plutôt un solide amorphe. Contrairement au graphite qui est facilement clivable le long des plans cristallins, les atomes de carbone de la fibre forment des liaisons en trois dimensions la rendant ainsi extrêmement solide (voir figure 2.5b). Le carbone étant un matériau peu dense, et formant des liaisons covalentes extrêmement fortes, la fibre possède alors une extrême solidité pour une masse très faible. Les principales caractéristiques de ce matériau sont données par la table 2.1.

Commercialement ces fibres sont soit livrées sous forme de bobine, en vrac dans le cas de fibres courtes, ou sous forme de tissus suivant l'application souhaitée. Les composites bas coûts et grand public sont fabriqués à base de fibres courtes, directement mélangées à de la résine. Les composites plutôt haut de gamme sont fabriqués à partir de couche de tissus alternés. Les différentes formes sont représentées sur la figure 2.6.



XXXXXX

FIG. 2.6: Forme commerciale des fibres de carbone : en bobine, tissu, et vrac [14]

Propriété	Fibre de carbone [15, 16]	Acier [17, 18]	Aluminium [17, 19]	Fibre de verre type E [20]
Densité ( $\text{kg m}^{-3}$ )	1750–1800	7850	2600–2800	2540–2600
Limite élastique (MPa)	3530–3650	276–1882	230–570	3500
Élongation à la rupture (%)	0.7–2.1	10–32	10–25	4.8
Coefficient d'expansion thermique ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	(−1.1)–(−0.38)	11–16	20.4–25.0	5.4
Conductivité thermique ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )	10–150	24–65	237	1.3
Chaleur massique ( $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )	710–750	450–2100	900–960	810
Température de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	3650	1500	477–660	1725

TAB. 2.1: Propriétés mécaniques des fibres de carbones, comparaison avec d'autres matériaux.

L'aspect toxicologique de la fibre de carbone est en cours de recherche. En effet bien que le carbone soit bénin vis-à-vis de l'organisme, il est recommandé de manipuler les fibres avec soin car elles provoquent des irritations, des problèmes respiratoires, et une fois cassées peuvent pénétrer sous la peau et provoquer des infections. En particulier les opérations de sciage et de ponçage doivent être effectuées sous hotte.

### 2.2.2 Les résines

La résine sert de matrice aux fibres ; elle a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort à base de fibre. Elle assure aussi la protection des fibres vis à vis de l'environnement, en particulier elle protège les fibres de l'abrasion. Les résines servent aussi de liant aux fibres les empêchant de se mouvoir librement.

La matrice en résine ne modifie quasiment pas la limite élastique de la pièce de composite, cependant elle a un rôle majeur au niveau des caractéristiques en compression de la pièce, en particulier dans la répartition des efforts entre les différents plans de fibres. Ainsi les caractéristiques à l'endommagement, en particulier la résistance à l'impact, des composites seront majoritairement fixées par la résine

Les résines sont bien souvent des polymères c'est-à-dire des longues chaînes de molécules composées à partir de la répétition de motifs moléculaires de base, joints par des liaisons covalentes (liaisons fortes). Les résines une fois polymérisées sont constituées de nombreux polymères organisés de manière aléatoire et forment ainsi un solide amorphe.

Dans le domaine du génie civil, le béton peut être considéré comme une résine au sens large. Les bétons armés de fibre de carbone sont appelés à se développer dans les années futures du fait de leur extrême résistance.

Les principales résines sont les résines à base de polyester qui sont bas coûts ; malheureusement elles résistent mal aux UV et se dégradent donc fortement au cours du temps. Une autre famille inclut les résines de type Vinylester qui résistent mieux aux UV mais possèdent l'inconvénient de fondre au contact des hydrocarbures. La famille des résines époxy ne possède pas les deux inconvénients majeurs précédents et est donc utilisée majoritairement dans l'industrie aéronautique.

La résine doit adhérer aux fibres sans les détériorer, et doit pouvoir parfaitement imprégner le tissu de fibre sans laisser de vide. Étant un matériau plastique elle est caractérisée par une température de transition vitreuse [21] c'est à dire la température à laquelle la résine devient plastique et donc plus facilement déformable. Dans le cas d'un matériau composite la température de service doit être suffisamment éloignée de la température de transition vitreuse, afin d'éviter une déformation des pièces.

La fibre subit bien souvent un traitement afin de la rendre plus mouillable par la résine et ainsi augmenter l'adhérence de la résine à la fibre. Ainsi les fibres de carbone sont bien souvent traitées à l'acide nitrique avant application de la résine.

### 2.2.3 Fabrication des composites laminaire

Les composites laminaires sont fabriqués par l'empilement de couches successives de tissus à base carbone imprégnés de résine et polymérisés. Les couches de tissus peuvent se compter par dizaine et sont souvent décrites par leur orientation respective. On parle par exemple de composite  $90^\circ/0^\circ/90^\circ$  ou  $90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/-90^\circ$ . Ces couches sont bien souvent elles mêmes tissées afin d'augmenter la résistance du composite. Quelques exemples de tissage sont disponibles sur la figure 2.7. Le choix du tissu et de l'orientation des couches de fibres est dicté par des considérations de résistance mécanique.

La fabrication des pièces aéronautiques utilise généralement un procédé haut de gamme appelé moulage sous vide [3, 22]. Ce procédé utilise des tissus de fibre de carbone préimprégnés de résine, contenant approximativement moitié de fibre, moitié de résine. Le composite final contiendra alors environ 60% de fibre, car lors de la fabrication, une partie de la résine coulera à l'extérieur, permettant ainsi de combler les vides et d'emporter l'air emprisonné.

La figure 2.8 représente de manière schématique le procédé de fabrication. La pièce à polymériser est recouverte d'une couche de verre poreux téfloné, afin de faciliter le démoulage. Autour de

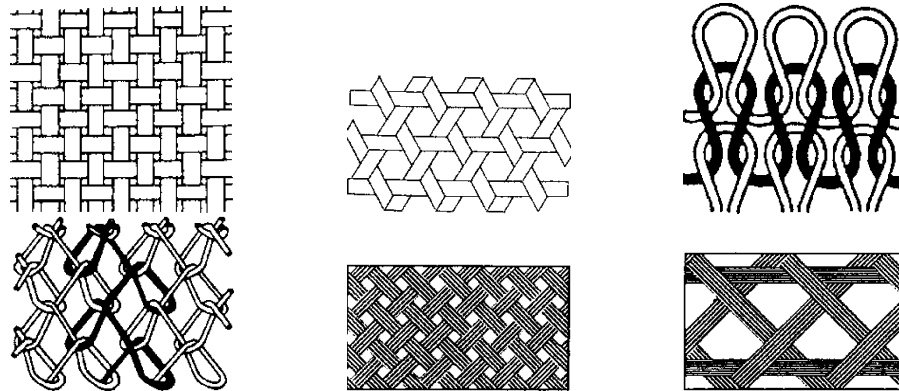


FIG. 2.7: Les principaux types de tissus utilisés dans la fabrication de composites [3].

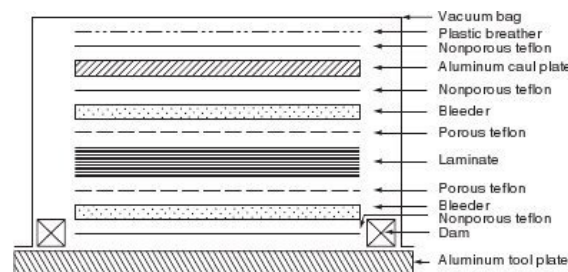


FIG. 2.8: Schéma du procédé de polymérisation sous vide [3].

cette couche de Téflon le fabricant dispose une couche de papier absorbant destinée à recueillir l'excès de résine. Ce papier est alors mis en pression par une couche de verre tefloné, et le tout est mis dans un sac dans lequel est effectué le vide.

L'assemblage final est alors mis en autoclave où la combinaison de la pression et de la chaleur initie la réaction de polymérisation. Le vide est continuellement effectué dans le sac, afin de drainer l'air emprisonné et d'enlever l'excès de résine. Après quelques heures en autoclave la pièce est alors prête et peut subir le démoulage.

#### 2.2.4 Le nid d'abeille

Le nid d'abeille a pour but d'écarter les deux plans en carbone du composite alvéolaire, tout en étant le plus léger possible. Il faut donc créer une structure creuse capable de supporter la charge compressive. Or, il peut être prouvé que le moyen de paver le plan avec le moins de matière consiste à utiliser un pavage régulier à base d'hexagones. Ce type de pavage possède en outre la caractéristique d'être très rigide ; en effet les contraintes qu'éprouvent localement une cellule hexagonale sont alors réparties de proche en proche sur tout le réseau.

Les matériaux composant les nids d'abeilles sont assez divers. Ils peuvent par exemple être composés de carton afin de diminuer très sensiblement la masse, de matière plastique de type époxy ou dans les applications demandant une très grande rigidité d'aluminium. Il convient de noter que les nids d'abeille à base de carton sont traités avec des matériaux hydrophobes afin d'éviter l'absorption d'eau, et donc leur ruine par dissolution.

Le collage des nids d'abeille est une opération délicate, qui peut s'accompagner de défauts :

- des ponts de résines, c'est-à-dire des alvéoles remplies de résine au lieu d'air.
- des décollements locaux.
- des enfoncements.



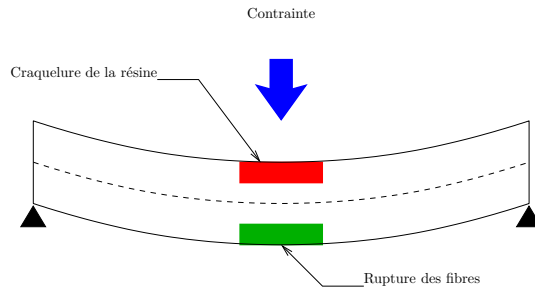


FIG. 2.9: Une plaque de composite sous contrainte, nature et localisation des défauts (vue de profil).

## 2.3 Endommagement des structures à base de carbone

Les structures à base de composites carbone comme tout matériau sont soumis à divers mécanismes dégradant leurs performances mécaniques. Cette section a pour but de décrire les divers mécanismes d'endommagement des composites carbonés et les conséquences de ces dommages.

### 2.3.1 Les mécanismes à la base des défauts

#### 2.3.1.1 La rupture

On sous-entend par rupture la rupture des fibres. La rupture des fibres est la conséquence du dépassement de la limite élastique, d'un impact, ou d'un défaut de fabrication. Comme les fibres contribuent majoritairement à la résistance mécanique de la structure composite, la rupture des fibres diminue grandement la solidité mécanique de l'ensemble.

Bien souvent, la rupture des fibres n'atteint pas la totalité de la pièce composite. En effet, par exemple dans le cas de l'application d'une force normale à la plaque de composite, il apparaît des fissures dans la résine sur la face soumise à la contrainte et des ruptures de fibres sur la face opposée (voir figure 2.9). Dans le cas aéronautique, ce type de rupture est donc difficilement détectable car elle apparaît sur la face opposée de celle accessible à l'inspection.

La rupture des fibres nécessite bien entendu une action corrective car elle peut rapidement mener à la ruine de la pièce. Notons par ailleurs que la rupture des fibres augmente la porosité du composite favorisant ainsi la pénétration d'eau dans la structure.

#### 2.3.1.2 La délamination

Alors que la rupture des fibres est un mécanisme prédominant dans le cas de matériaux composites monocouches, la délamination est un mécanisme prépondérant d'endommagement des matériaux composites multicouches. La délamination est le décollement des différents plans du composite (voir figure 2.10). En effet, l'énergie nécessaire au décollement des plans est toujours plus faible que l'énergie nécessaire à la rupture des fibres.

La délamination est un défaut sournois car elle n'est point visible de la surface du composite et pourtant elle diminue de manière très sensible les caractéristiques mécaniques. En outre, ce défaut a tendance à s'étendre de manière exponentielle. En effet, la délamination crée, au niveau de la frontière, des contraintes de cisaillement qui ont tendance à étendre la zone délaminée. L'évolution de la délamination se fait en quatre phases [24] :

- une phase d'initialisation, suite bien souvent à un impact, qui décolle localement les couches de composites.
- une phase d'extension locale de la délamination.
- une phase de stabilisation où les contraintes se répartissent de manière plus uniformes, la délamination croît lentement
- une phase d'extension soudaine et quasiment instantanée (instable) ; le composite est alors complètement ruiné, la zone délaminée occupant toute la pièce composite.

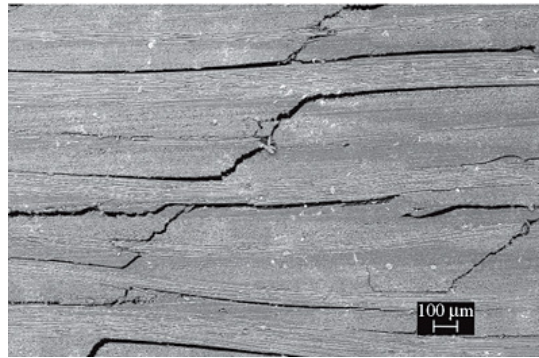


FIG. 2.10: Coupe d'un composite carbone délaminé au microscope [23]

La dernière phase, appelée mort subite, étant très dangereuse pour la qualité de la pièce, il convient de contrôler régulièrement les structures à base de composite afin d'éviter les accidents.

## 2.3.2 Les causes des défauts

### 2.3.2.1 Les impacts

Les propriétés à l'impact d'un matériau représente sa capacité à dissiper et absorber l'énergie suite à un impact ou à un choc. En pratique, pour un avion, les impacts peuvent aller de la clef de 10 tombant sur la structure lors d'une opération de maintenance, à un choc avec une oie à la vitesse de croisière. Les dommages résultant d'un impact peuvent être très localisés ou être une complète destruction du composite (voir les exemples très visuels de la figure 2.11).

Vu l'énergie des impacts en jeu<sup>①</sup>, il est quasiment impossible de s'en prémunir totalement. Il convient donc tout d'abord que le composite possède une forte résistance à l'impact, et qu'en second lieu il dissipe efficacement le surplus d'énergie. Augmenter la résistance à l'impact consiste à utiliser des matériaux à haute résistance mécanique et à ne pas soumettre la structure à de trop grandes contraintes statique, afin de s'assurer une marge de sécurité. Cette première ligne de défense, allant dans le même sens qu'une augmentation globale des performances mécaniques, est assez naturelle à obtenir.

La seconde ligne de défense consiste à diminuer l'influence du dommage, c'est-à-dire à rerépartir les contraintes, et à éviter la propagation de la fracture. En règle générale plus le matériau est dur, plus il est cassant. A titre d'exemple, une céramique est extrêmement dure mais cassante alors qu'une barre d'aluminium est moins résistante mais plus ductile. Néanmoins, dans le cadre d'un matériau composite, il est possible d'obtenir une assez bonne résistance à l'impact en jouant sur la délamination. Une rupture des fibres suite à un impact cause ainsi une importante contrainte de cisaillement au niveau des couches de composite adjacentes, causant ainsi une délamination qui en retour arrête la propagation de la fracture et diminue la contrainte. Ainsi le matériau composite peut posséder un comportement ductile à la fracture.

Cependant, contrairement au métal ce comportement ductile provoque des dommages irréversibles à la structure du fait de la création de délamination. Il convient donc de détecter les impacts afin de procéder à leur évaluation au plus tôt.

### 2.3.2.2 La fatigue

La fatigue est un phénomène progressif d'endommagement touchant les matériaux soumis à des charges cycliques, comme par exemple la houle sur un bateau ou les cycles décollage/atterrissage sur un avion. Au bout d'un certain nombre de cycles le matériau subit une dégradation importante de ses caractéristiques pouvant ainsi mener jusqu'à la rupture catastrophique. Le phénomène de fatigue dans les matériaux composites peut se décomposer en deux phases.

<sup>①</sup>A titre d'exemple, une oie de 5 kg qui tape contre un avion à 800 km/h possède une énergie cinétique de 246 kJ.

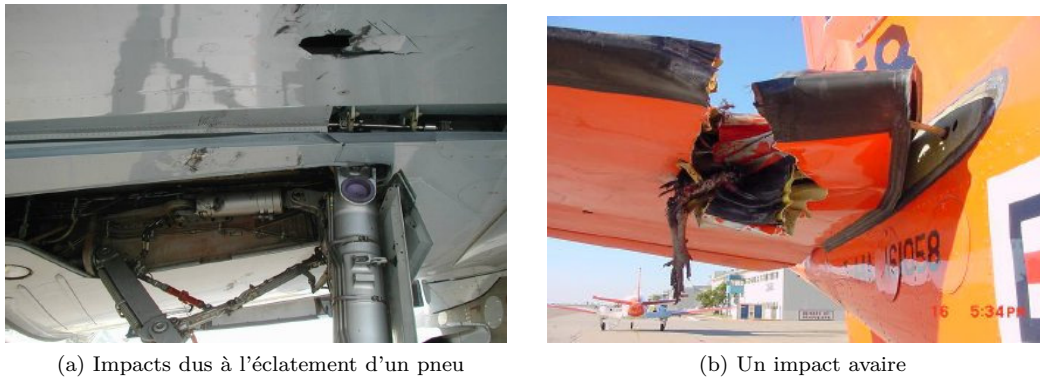


FIG. 2.11: Quelques exemples d'impacts en aviation [25].

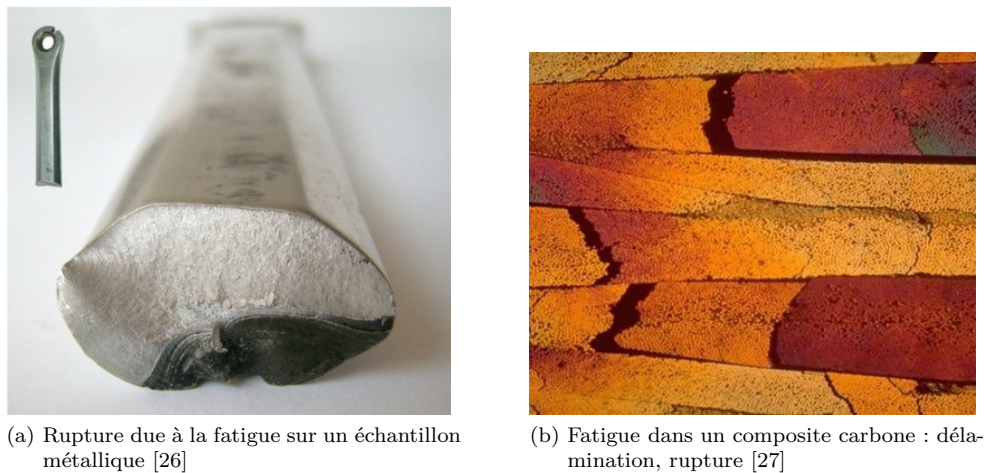


FIG. 2.12: Le phénomène de fatigue

Comme dans un échantillon métallique, la fatigue peut naître de microfissurations : dans une première phase des microfissures sont créées puis dans un deuxième temps ces fissures grandissent et se regroupent jusqu'à complètement fissurer l'échantillon de part en part (voir la figure 2.12a).

Cependant, dans les matériaux composites bien que le mode de fatigue précédent existe, les défauts locaux sont plutôt rares du fait de la nature complexe du matériau. En particulier, le cyclage joue de manière différente sur la phase fibres que sur la phase résine. La résine va plutôt se craqueler alors que les fibres vont se désolidariser. De plus, la fatigue va provoquer des délaminations (voir la figure 2.12b), qui vont au cours du temps s'étendre et ainsi feuilletter le composite. La fin de vie du matériau est ainsi beaucoup plus violente et catastrophique [28]. Contrairement au métal où la détérioration mécanique est assez progressive, le matériau composite fatigué rompt brutalement (phénomène dit de mort subite).

Pour finir, notons que la fatigue est un phénomène à ne pas sous-estimer ; à titre d'exemple un bateau en vingt ans peut être soumis jusqu'à cent millions de cycle de fatigue à cause de la force qu'exerce la houle sur la coque [28, 29]. Dans le cadre aéronautique, le cyclage basse pression en altitude, haute pression au sol est aussi très destructeur ; en particulier, il peut faire grandir très vite les délaminations existantes.

### 2.3.2.3 L'infiltration d'eau

L'eau agit sur le composite au travers de plusieurs mécanismes. En premier lieu, la percolation d'eau ou d'autres substances de faible poids moléculaire à l'intérieur du composite peut mener à

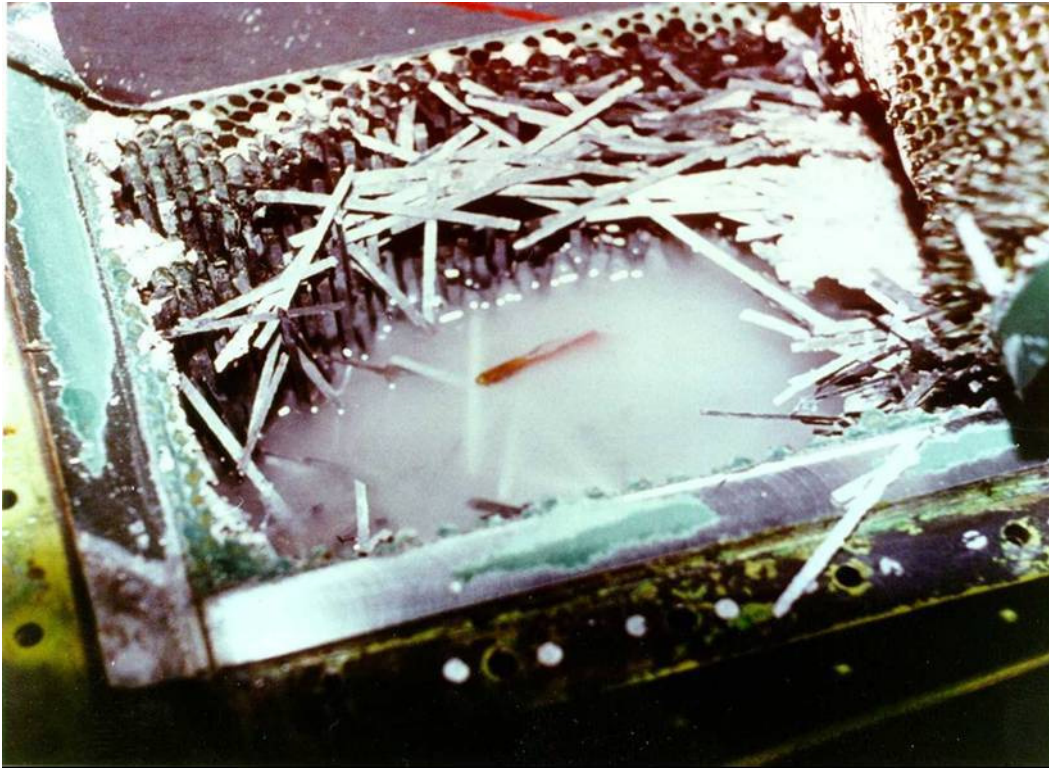


FIG. 2.13: L'eau dans les composites carbonés [25].

une diminution de la résistance mécanique de la pièce due essentiellement à une diminution des liens entre la résine et les fibres (effet de lubrification).

En outre, l'eau pénétrant les composites à base de matrice plastique, diminue de manière sensible la température de transition vitreuse [21] augmentant ainsi la plasticité et donc changeant la réponse aux impacts du composite [30]. Si la température de transition vitreuse du matériau est dépassée alors qu'il endure une contrainte, il se peut que la structure subisse une déformation plastique, c'est-à-dire une déformation définitive de la pièce. À titre d'exemple la température de transition vitreuse de la résine qui entre dans la composition du gouvernail d'un airbus A310 est de 102 °C mais à peine de 75 °C lorsque elle est chargée d'humidité. Cette dernière température étant potentiellement dangereuse car la paroi extérieure de l'avion a pu être mesurée à des températures supérieures lors de campagnes d'essais [31].

Le mécanisme principal d'endommagement dû à l'eau est néanmoins causé par les cycles gel-dégel. En effet, dans le cas des matériaux alvéolaires, l'eau rentre dans la structure par une porosité, et s'accumule dans le composite suivant un mécanisme de type cercle vicieux :

- En altitude l'eau gèle, et gonfle exerçant ainsi des contraintes sur le nid d'abeille. Elle expulse aussi de l'air de la cellule du nid d'abeille.
- Au sol, l'eau dégèle, dégonfle et aspire ainsi l'air humide qui se condense dans la cellule.
- Le cycle recommence jusqu'à destruction de la paroi du nid d'abeille.

Ce mécanisme de gel-dégel est très vicieux et peut conduire à la destruction complète du composite (voir figure 2.13).

En outre l'eau forme avec le liquide hydraulique un fluide particulièrement nocif pour le composite. Le liquide hydraulique est fabriqué à partir d'un composé à base de phosphore. Au contact de l'eau ce composé se transforme en acide phosphorique qui attaque les colles et la résine. Ce mécanisme d'endommagement est bien sûr irréversible. Il convient aussi de noter que l'eau accélère de manière très importante le phénomène de fatigue des matériaux composite [32]. L'eau est donc un poison pour les composites.





FIG. 2.14: Exemple de pièce foudroyée [25]

#### 2.3.2.4 La foudre

Les avions sont soumis de nombreuses fois au cours de leur service à la foudre. La foudre est un phénomène assez fréquent qui est particulièrement destructif pour les composites. En effet, les composites sont beaucoup moins conducteurs que les matériaux métalliques ce qui provoque, lors du foudroiement, un important échauffement. Cet échauffement détruit la résine, pyrolyse les fibres (voir la figure 2.14), et provoque des dommages plus ou moins éloignés sur l'avion<sup>①</sup>

Les dommages liés à la foudre sont sournois car bien souvent la foudre rentre dans le composite par un point d'entrée, et se propage dans la structure de manière invisible sur de longues distances, affaiblissant très grandement la pièce mécanique. À titre conservatif, les pièces foudroyées subissent un échange standard et sont définitivement remises, même si elle pourraient être réparées.

## 2.4 Incidents liés aux composites en aviation

### 2.4.1 American Airlines 587

Cet accident est le plus mortel de ces trente dernières années ayant eu lieu sur le sol des États Unis [33]. Le 12 novembre 2001, juste après le décollage de l'aéroport John F. Kennedy, un airbus A300 s'écrasa dans le quartier du Queens, tuant les 260 passagers et membres d'équipage et 5 personnes au sol. La gouverne et le stabilisateur vertical se sont détachés de l'avion en cours de vol à environ 2 km du point de crash, rendant ainsi l'aéronef incontrôlable. La cause secondaire de ce crash est la rupture d'une pièce composite, en particulier le trou permettant de fixer le stabilisateur au fuselage (voir la figure 2.15).

La cause principale de ce crash est due à une sur-réaction du pilote sur les commandes suite à l'entrée de l'avion dans la turbulence de sillage de l'avion ayant décollé précédemment. Cette sur-réaction a produit une charge aérodynamique dépassant les spécifications mécaniques du stabilisateur vertical. Cependant le fait que la condition de vol hors limite structurelle soit facilement accessible, a conduit les compagnies aériennes à une campagne de contrôle non destructif sur la série des A300, afin de contrôler que des surcharges non prévues n'avaient pas abîmé les

---

<sup>①</sup>Remarquons aussi que la foudre pose d'autres problèmes au niveau des composites carbonés. Du fait de leurs plus faibles conductivités, ils blindent moins l'intérieur de l'avion ce qui pose des problèmes aigus de CEM. De plus ils ne peuvent assurer, au contraire des matériaux métalliques, une bonne mise à la masse de la structure. Pour ces raisons les matériaux composites en aviation sont bien souvent doublés d'un grillage en bronze.



FIG. 2.15: Photo de la zone de rupture du stabilisateur vertical du vol American Airlines 587 [33]

dérives. Cet accident a donc ouvert le champs de la recherche des dégâts spécifiques aux pièces de structure en composite.

En particulier il a été révélé qu'un airbus A300 ayant expérimenté un vol hors limite en 1997, le vol American Airlines 903, n'a vu certains dommages structuraux détectés sur des pièces en composite carbone qu'en mars 2002 après une demande d'inspection due à l'accident du vol 587. Le dommage était suffisamment grave (délamination) pour que le stabilisateur soit considéré impropre à voler et remplacé par une pièce neuve. Les inspections après l'accident initial n'ont pas révélé ce dommage et ce n'est qu'après démontage complet de la pièce et inspection minutieuse que ce défaut structurel majeur a pu être détecté. Cet avion, bien que très surveillé suite à cet incident, a donc volé cinq années avec une pièce très endommagée, pouvant potentiellement mener à une catastrophe semblable à celle du vol 587.

#### 2.4.2 Air Transat 961

Le vol 961 était un vol régulier sur Airbus A310, transportant 262 passagers de Varadero, Cuba vers Quebec, Canada, le 5 mars 2005 [31]. Le décollage se passait sans encombre et environ 15 minutes après le début du vol au large de Miami après un bruit suspect, l'avion commença à partir en roulis hollandais, l'équipage réussit à maîtriser l'avion. L'ordinateur de bord ne signala aucun problème structurel ou de pièce manquante et l'équipe au sol estima que l'avion ne nécessitait pas d'atterrir en urgence et pouvait retourner à son point de départ pour réparation. L'avion atterrit malgré une certaine difficulté à être contrôlé. Ce ne fut qu'après que l'avion soit sur le parking que l'équipage se rendit compte que la gouverne verticale était manquante (voir figure 2.16).

Le rapport d'enquête a conclu que le gouvernail, dont la structure interne est en composite carbone de type nid d'abeille, s'est détaché suite à des défauts structuraux non détectés. Aucune faute humaine n'a pu être retenue. Le gouvernail n'ayant été retrouvé, il n'a pas été possible d'effectuer des analyses pour déduire le type de défaut structurel ayant entraîné la rupture. Le *bureau enquête et accident* a donc demandé à tous les exploitants de contrôler les gouvernails des airbus A310. Il a été découvert à cette occasion qu'un airbus A310 possédait une queue comportant 26 l d'eau, soit approximativement un tiers du volume de la pièce. La problématique de l'eau captive dans ces structures a donc été reconnue, en particulier le caractère destructeur de son mélange avec le liquide hydraulique.

Finalement le *bureau enquête et accident* a recommandé d'améliorer le programme de contrôle non destructif, en particulier le type et le nombre d'inspections. Il souligne en particulier que les inspections visuelles sont insuffisantes dans le cas des matériaux composite en particulier pour détecter l'eau ou la délamination.



FIG. 2.16: Photo de la queue du vol Air Transat 961 [34]. On remarque les restes du gouvernail accrochés à la base de la queue.

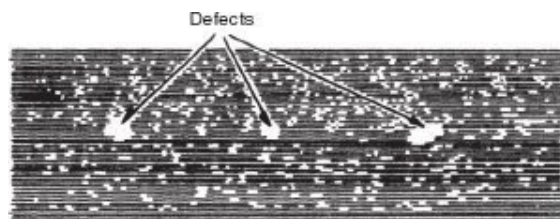


FIG. 2.17: Exemple de mesure ultrasonore d'une pièce en composite [3]

## 2.5 Les moyens d'inspection

### 2.5.1 Les ultrasons

Les ultrasons sont à l'heure actuelle la méthode reine pour la détection de défaut sur des matériaux composites. Cette méthode utilise comme moyen de détection des ondes sonores hautes fréquences (1 MHz–25 MHz) qui sont réfléchies ou atténuées par les différents défauts du composite. En règle générale ces ondes sont générées par un transducteur piezo-électrique et transmises à la pièce sous test au travers d'un gel. Comme pour les radars, la détection peut être monostatique c'est-à-dire que l'émetteur sert aussi de récepteur, ou bistatique dans lequel le module récepteur est différent de l'émetteur. D'autres méthodes de génération existent comme par exemple une génération d'ultrasons par des moyens microondes [35], mais ces méthodes restent anecdotiques.

Ces méthodes permettent de détecter assez facilement les délaminations et les amas de micros fissures. Bien souvent l'outil de mesure permet une reconstruction virtuelle de la pièce mesurée sous forme de coupe ou de vues 3D facilitant ainsi la prise de décision. Un exemple de résultats de mesure est donné par la figure 2.17.

Cependant cette méthode n'arrive pas à discerner de manière satisfaisante l'eau incluse dans les composites sandwichs et ne permet pas de détecter les micro-défauts diffus.

### 2.5.2 La radiographie

La radiographie permet de détecter les défauts de la pièce en envoyant un flot de photons de haute énergie à partir d'un des côtés de la pièce et les enregistrant sur la surface opposée. La radiographie conventionnelle utilise des rayons X comme source de radiation et enregistre les défauts internes sous forme d'ombres. Les rayons gamma sont aussi utilisés car ils pénètrent

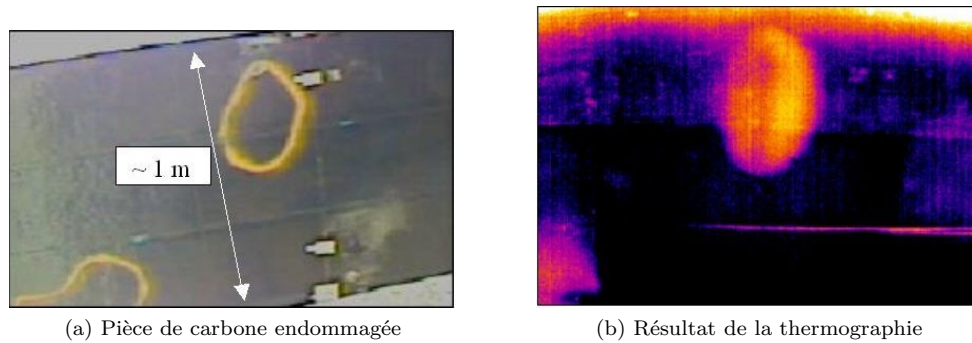


FIG. 2.18: Exemple de thermographie d'une plaque de composite avec une délamination [36].

de manière plus profonde dans le composite. Il est aussi possible d'utiliser des neutrons afin de détecter par exemple l'eau (les neutrons sont fortement absorbés par l'eau) ou encore des positrons.

La radiographie est capable de détecter dans les composites les vides suffisamment gros, les inclusions, les fractures entre plis, et les problèmes de répartition de fibres (mauvaise orientation, non uniformité). Cependant, les petits défauts sont difficilement détectables par ce genre de méthode car ils ne modifient pas de manière suffisante l'absorption des radiations.

Un des gros inconvénients de ces méthodes est d'ordre réglementaire. Étant dangereuse pour l'être humain (radiation ionisante), elle nécessite donc nombreuses précautions pour leur mise en œuvre et des formations et habilitations très spécifiques pour le personnel. Leur coût en capital, c'est-à-dire l'investissement initial, est ensuite loin d'être négligeable.

### 2.5.3 La thermographie

La thermographie est une méthode basée sur le principe de l'altération de conductivité thermique locale du matériau à tester par la présence de défaut. En pratique, on soumet le matériau sous test à une source de chaleur uniforme (typiquement des couvertures chauffantes), puis l'on stoppe cette source et l'on regarde à la caméra infrarouge le profil de température de la pièce. Le chauffage peut être de plusieurs type des simples sacs d'eau chaude jusqu'aux microwaves.

Une variante de cette méthode est la vibrothermographie, dans laquelle la surface à tester est mise en vibration, ce qui réchauffe localement la pièce. Il a été observé empiriquement que les défauts avaient tendance à provoquer des pertes vibratoires et donc un réchauffement local à leur niveau. Les températures sont enregistrées de la même manière que précédemment. Un exemple de résultat de test est donné par la figure 2.18.

Ces méthodes ont fait leurs preuves pour détecter la délamination. Malheureusement, la tendance actuelle du contrôle non destructif est de délocaliser ces inspections vers des pays où la main d'œuvre est bon marché, pays où le climat est plutôt chaud, ce qui rend la mesure par thermographie très bruitée<sup>①</sup>.

### 2.5.4 L'inspection sous vide

Afin de détecter les défauts de type délamination il a été mis au point une technique d'inspection appelée inspection sous vide [37]. Cette méthode appelée ELCH#1 chez airbus [38], consiste à aspirer la surface du composite et à mesurer la force nécessaire à la déformation du composite. Si le composite est délaminé cette force sera alors moins importante. Cette méthode de principe simple est néanmoins encore plus lente à mettre en œuvre que les méthodes ultrasonores ; en effet, il faut parcourir pas à pas la surface en pompant et mesurant. La déformation peut être faite à l'aide d'une technique de moiré ou tout simplement par des moyens mécaniques. Néanmoins

<sup>①</sup>Communication orale des responsables d'une des sociétés leader du marché en contrôle non destructif de pièces aviation.





FIG. 2.19: Le dispositif ELCH#1 d'inspection sous vide d'airbus [38].

cette méthode peut souffrir de faux négatifs dans le cas où la peau est poreuse ce qui est souvent le cas suite à un impact.

### 2.5.5 Le contrôle destructif

En cas de doute ou d'accident, il est toujours possible d'effectuer des contrôles à l'intérieur de la pièce comme par exemple, un prélèvement d'échantillon et une microscopie optique ou électronique de l'échantillon, ce qui permettra de mieux connaître le phénomène destructeur. Il est aussi possible de faire des analyses fines sur les fibres ou la résine afin de savoir si la mise en œuvre a été correcte. Néanmoins, ce type de méthode est chère, à la fois du fait de leur technicité mais surtout à cause du fait que la pièce doit être sacrifiée. Ces méthodes ne sont donc utilisées qu'en dernier ressort. D'autres bien que nécessitant pas la destruction de la pièce ne permettent pas un contrôle efficace. Il est, par exemple, possible de rechercher l'eau dans les composites alvéolaires par sondage, c'est-à-dire en faisant un nombre limité de petits trous dans la structure et en regardant si ces trous contiennent de l'eau. Ce type de méthode n'est pas du tout adapté à la recherche systématique de l'eau.

## 2.6 Conclusion

La détection des défauts structuraux sur des plaques de composite carbone est une ancienne thématique de recherche qui revêt une importance critique, en particulier au regard des effets dramatiques que peut avoir la rupture d'une pièce carbone, tant en coût humain qu'en coût financier et en investissement.

Les techniques habituelles à base d'ultrasons ou de thermographie sont limitées et ne permettent pas de détecter certains types de défauts pouvant s'avérer critiques. Il est donc nécessaire de rechercher de nouvelles méthodes de contrôle non destructifs spécifiques aux pièces en composite.

## 2.7 Bibliographie

- [1] HEXCEL CORPORATION. *Investor presentation*. Anglais. Fév. 2009. URL : <http://tinyurl.com/b7zsp9> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 5, 6.
- [2] SEATTLE POST-INTELLIGENCER. *Dreamliner 101 : all about the Boeing 787*. 2007. URL : <http://seattlepi.nwsourc.com/boeing/787/787primer.asp> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 5, 7.
- [3] P. K. MALLICK. *Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design*. 3<sup>e</sup> éd. Boca Raton : CRC Press, 2007. ISBN : 0-8493-4205-8. Cf. p. 6, 10, 11, 18.
- [4] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Boeing 787*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boeing\\_787](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boeing_787) (visité le 01/03/2009). Cf. p. 7.
- [5] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Composite Honeycomb*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Composite\\_honeycomb](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Composite_honeycomb) (visité le 01/03/2009). Cf. p. 7.

- [6] Joseph W. SWAN. « Electrical lamp ». Anglais. Brev. américain 234345. 9 nov. 1880. Cf. p. 8.
- [7] Joseph W. SWAN. « Electrical lamp ». Anglais. Brev. américain 233445. 19 oct. 1880. Cf. p. 8.
- [8] Thomas E. EDISON. « Electrical lamp ». Anglais. Brev. américain 223898. 27 jan. 1880. Cf. p. 8.
- [9] Thomas E. EDISON. « Manufacture of carbons for incandescent electric lamp ». Anglais. Brev. américain 238868. 15 mar. 1881. Cf. p. 8.
- [10] Roger BACON. « Growth, Structure, and Properties of Graphite Whiskers ». Dans : *Journal of applied physics* 31.2 (fév. 1960), p. 283–290. ISSN : 0021-8979. DOI : 10.1063/1.1735559. Cf. p. 8.
- [11] AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. *High Performance Carbon Fibers*. URL : <http://acswebcontent.acs.org/landmarks/landmarks/carbon/car1.html> (visité le 31/10/2007). Cf. p. 8.
- [12] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Carbon fiber*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbon\\_fiber](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbon_fiber) (visité le 01/03/2009). Cf. p. 8.
- [13] NEW TRAD INC. *Diamond, Buckyballs, and Graphite*. 2009. URL : <http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/BDGtext/BDGtoc.html> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 8.
- [14] TOHO TENAX. *Toho Tenax website*. 2009. URL : <http://www.tohotenax.com/> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 9.
- [15] TORAY INDUSTRIES, INC. *Fundamental of the carbon fiber technology and their application to "Torayca" products*. 2007. URL : <http://www.torayca.com/techref/index.html> (visité le 31/10/2007). Cf. p. 9.
- [16] HEXCEL CORPORATION. *Carbon Fiber Data Sheets – Continuous Fiber*. 2007. URL : <http://www.hexcel.com/Products/Downloads/Carbon+Fiber+Data+Sheets.htm?ds=Continuous> (visité le 31/10/2007). Cf. p. 9.
- [17] Nicolas P. CHEREMISINOFF. *Materials selection deskbook*. Noyes publication, 1996. ISBN : 0-81551400-X. Cf. p. 9.
- [18] EFUNDA EDITORS. *General Properties of Steels*. 2007. URL : [http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy\\_home/steels\\_properties.cfm](http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/steels_properties.cfm) (visité le 31/10/2007). Cf. p. 9.
- [19] EFUNDA EDITORS. *Aluminum Properties*. 2007. URL : <http://www.efunda.com/materials/alloys/aluminum/properties.cfm> (visité le 31/10/2007). Cf. p. 9.
- [20] MATWEB EDITORS. *Generic E-Glass Fiber*. 2007. URL : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=900> (visité le 31/10/2007). Cf. p. 9.
- [21] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Glass transition temperature*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Glass\\_transition\\_temperature](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Glass_transition_temperature) (visité le 31/03/2008). Cf. p. 10, 15.
- [22] QUATRO COMPOSITES. *Composite Molding*. URL : <http://www.quatrocomposites.com/comp101proc.htm> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 10.
- [23] Jane Maria Faulstich DE PAIVA, Sergio MAYER et Mirabel Cerqueira REZENDE. « Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field ». Anglais. Dans : *Material research* 8.1 (jan. 2005), p. 91–97. ISSN : 1516-1439. DOI : 10.1590/S1516-14392005000100016. Cf. p. 13.
- [24] Narendra Venugopal BHAT. « Delamination growth in graphite/epoxy composite laminates under tensile loading ». Anglais. Thèse de doct. Boston, MA, USA : Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Aeronautics et Astronautics. Cf. p. 12.

- [25] Carlos BLOHM. « Lufthansa Perspectives on Safe Composite Maintenance Practices ». Dans : *Commercial Aircraft Composite Repair Committee (CACRC) Meeting and Related Industry/FAA/EASA Workshop*. Amsterdam : National Institute For Aviation Research, 2007. Cf. p. 14–16.
- [26] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Fatigue (material)*. 2009. URL : [http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material)) (visité le 23/03/2009). Cf. p. 14.
- [27] ONERA. *Onera the french aerospace laboratory*. URL : <http://www.onera.fr> (visité le 23/03/2009). Cf. p. 14.
- [28] Bryan HARRIS, éd. *Fatigue in Composites. Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Cambridge, England : Woodhead & CRC Press, 2003. ISBN : 1-85573-608-X. Cf. p. 14.
- [29] C. ZWEBEN et M. W. WARDLE. « Flexural Fatigue of Marine Laminates Reinforced with Woven Roving of E-Glass and of Kevlar 49 Aramid ». Dans : *Proceedings of 34th Annual Meeting of Society of Plastics Institute-Reinforced (SPI), Plastics/Composites Division*. New Orleans, LA 1979. Cf. p. 14.
- [30] William M. BANKS et al. « Dielectric and mechanical assessment of water ingress into carbon fibre composite materials ». Dans : *Computers & Structures* 76.1 (mai 2000), p. 43–55. ISSN : 0045-7949. DOI : 10.1016/S0045-7949(99)00145-5. Cf. p. 15.
- [31] *Rapport d'enquête aéronautique. Perte de la gouverne de direction en vol de l'airbus A310-308 G-CPAT exploité par Air Transat à 90 NM au sud de miami en floride le 6 mars 2005*. Rap. tech. A05F0047. Canada : Bureau de la sécurité des transport du canada, 2007. URL : <http://www.bst.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2005/a05f0047/a05f0047.pdf>. Cf. p. 15, 17.
- [32] K. E. HOFER et al. « Effect of Moisture on Fatigue and Residual Strength Losses for Various Composites ». Dans : *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 6.1 (1987), p. 53. ISSN : 0731-6844. DOI : 10.1177/073168448700600105. Cf. p. 15.
- [33] *In-Flight Separation of Vertical Stabilizer, American Airlines Flight 587, Airbus Industrie A300-605R, N14053 Belle Harbor, New York, November 12, 2001*. Anglais. Rap. tech. NTSB/AAR-04/04. 490 L'Enfant Plaza, S.W. Washington, D.C. 20594 : National Transportation Safety Board, 2004. Cf. p. 16, 17.
- [34] Air DISASTER. *The aircraft [C-GPAT]. Accident photo gallery*. URL : <http://www.airdisaster.com/photos/c-gpat/photo.shtml> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 18.
- [35] E. GUILLIORIT et al. « Microwave excitation of ultrasound in graphite–fiber reinforced composite plates ». Dans : *Ultrasonics* 41.2 (2003), p. 97–103. ISSN : 0041-624X. DOI : 10.1016/S0041-624X(02)00432-8. Cf. p. 18.
- [36] Glenn WASHER. « Nondestructive Evaluation For Highway Bridges In The United States ». Anglais. Dans : *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. T. 8. 10. Berlin, Germany : DGZfP, 2003. ISBN : 3-931381-49-8. Cf. p. 19.
- [37] J. GRYZAGORIDIS, D. FINDEIS et NB VUKEYA. « Vacuum excitation in shearographic NDT ». Anglais. Dans : *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 49.2 (fév. 2007), p. 98–101. ISSN : 1354-2575. Cf. p. 19.
- [38] Roland THÉVENIN. « Airbus Composite Structures. Perspectives on safe maintenance practice ». Dans : *Commercial Aircraft Composite Repair Committee (CACRC) Meeting and Related Industry/FAA/EASA Workshop*. Amsterdam : National Institute For Aviation Research, 2007. Cf. p. 19, 20.

## Chapitre 3

# Méthodes de détection électriques

### Table des matières

3.1	Introduction . . . . .	23
3.2	Données électriques sur les fibres de carbone et les composites carbone . . . . .	24
3.2.1	Résultats concernant les composites en l'absence de contraintes . . . . .	24
3.2.2	Influence des contraintes sur les composites carbonés . . . . .	24
3.2.3	Conclusion . . . . .	25
3.3	État de l'art des différentes méthodes de mesures électriques sur des composites carbonés . . . . .	26
3.3.1	Les mesures résistives . . . . .	26
3.3.1.1	Introduction . . . . .	26
3.3.1.2	Quelques résultats expérimentaux . . . . .	26
3.3.2	Les méthodes dites potentielles . . . . .	29
3.3.3	Les méthodes à base de courants de Foucault . . . . .	29
3.3.3.1	Introduction . . . . .	29
3.3.3.2	Quelques exemples . . . . .	31
3.3.4	Traitement du signal et évaluation des dommages . . . . .	32
3.4	Introduction aux méthodes de mesure radiofréquences . . . . .	32
3.4.1	Propagation des ondes . . . . .	32
3.4.2	Quelques applications et exemples dans le domaine des matériaux . . . . .	33
3.5	Conclusion . . . . .	33
3.6	Bibliographie . . . . .	34

### 3.1 Introduction

La détection des défauts dans les composites carbonés est difficile par les moyens actuels. Les méthodes commerciales existantes utilisées de nos jours sont essentiellement mécaniques et ne permettent pas de détecter tous les types de défauts, en particulier l'eau ou le foudroiement. En outre, elles imposent des contraintes particulières (les ultrasons nécessitent l'application d'un gel), ou sont lentes (la détection par l'inspection sous vides l'est particulièrement).

La recherche de nouvelles solutions de détections aptes à résoudre la problématique du contrôle non destructif des matériaux carbone est donc nécessaire. Dans le cas des échantillons métalliques, il existe une famille de méthodes de détection efficace basée sur les caractéristiques électriques. Ce type de méthode n'est pas utilisée à l'échelle commerciale dans le cas des matériaux à base de fibre de carbone mais elle a fait l'objet de recherche.

Ces méthodes consistent à faire circuler un courant électrique dans le matériau à tester et à corréler l'état mécanique à une variation des paramètres électriques.

Dans un premier temps nous résumerons les recherches effectuées sur les caractéristiques électriques des composites carbonés. Puis nous effectuerons un état de l'art des méthodes électriques,

au sens large, appliquées au composite carbonés et enfin nous présenterons quelques méthodes de mesure diélectrique.

## 3.2 Données électriques sur les fibres de carbone et les composites carbone

### 3.2.1 Résultats concernant les composites en l'absence de contraintes

La résistance des fibres de carbone seules est bien connue [1], mais varie entre autres, suivant la qualité des fibres, le procédé de fabrication des fibres et le diamètre de la fibre. Les valeurs communément admises de conductivité des fibres de carbone nues varient de  $18 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$  à  $30 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$ , soit une variation de plus de 50%. Il convient de noter que peu d'études ont été effectuées concernant l'influence des traitements que peut subir la fibre de carbone, en particulier sur l'influence du procédé d'oxydation par l'acide nitrique, procédé visant à améliorer l'adhérence de la fibre.

Diverses mesures sur des composites carbonés ont été effectuées. Il apparaît que les composites carbonés ont une conductivité de l'ordre de  $10^{-4} \Omega \text{ m}$  dans le sens des fibres à  $10^{-2} \Omega \text{ m}$  dans le sens transverse [2–5], pour des composites monocouche. Certains auteurs trouvent même une différence de 4 ordres de grandeur entre la résistivité transverse et longitudinale [6].

Dans le cas des composites, il est bon de noter que la qualité de la polymérisation et les divers traitements associés influent grandement sur la conductivité finale du composite [7, 8]. Il convient aussi de remarquer que des dispersions importantes au niveau de la résistivité peuvent exister (jusqu'à 20%) au sein d'une même plaque de carbone [8, 9]. Néanmoins, la résistance propre des plaques carbonées ne varie pas au cours du temps en l'absence de contraintes extérieures [10]. Cette grande variabilité trouve sa source à la fois dans le fait que les fibres de carbone composant le composite sont loin d'être parfaitement identiques, et dans le fait que le procédé de fabrication du tissu et du composite induit de la dispersion.

La constante diélectrique d'un composite carbone classique varie elle aussi en fonction du type de résine, de la fréquence et de la concentration en fibre. Expérimentalement,  $\epsilon_r$  se situe au alentour de 3–4 [11] dans la gamme de fréquence 100 kHz–100 MHz. Cette valeur peut changer de manière très sensible en fonction du degrés d'absorption en eau.

### 3.2.2 Influence des contraintes sur les composites carbonés

La fibre de carbone, comme toute fibre conductrice, possède un comportement piezorésistif c'est-à-dire que la résistance varie en fonction de l'élongation. De manière qualitative, une élongation de la fibre dans le sens de la longueur se traduit par une diminution de la largeur de la fibre. Cette variation géométrique du profil produit alors un changement de résistance. La résistance  $R$  d'une fibre de longueur  $l$ , de section droite  $A$  (et de rayon  $R$ ) et de résistivité  $\rho$  est défini par la relation :

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi R^2} \quad (3.1)$$

Après élongation, la résistance est alors :

$$R + \Delta R = (\rho + \Delta \rho) \frac{l + \Delta l}{\pi (R - \Delta R)^2} \quad (3.2)$$

Ainsi une augmentation de l'élongation se traduira par une augmentation de la résistance électrique.

Les fibres de carbone sont d'ailleurs utilisées comme jauge de contrainte depuis de nombreuses années. Bien que la réponse de la fibre seule soit régie par les lois classiques de la physique, la réponse des fibres de carbone dans un composite est plus complexe et a donné lieu à débat scientifique. En effet, la sensibilité piezorésistive [12] d'un composite carbone unidirectionnel a été déterminée de manière expérimentale par plusieurs auteurs [2, 13–17], qui ont trouvé une sensibilité piezorésistive positive, c'est-à-dire que la résistance augmente avec l'effort appliqué comme dans le cas de la fibre seule. Cependant, d'autres équipes ont trouvé une sensibilité piezorésistive

totale et négative [18–20]; Le mécanisme à l'œuvre d'après ces auteurs est un réaligement des fibres dans le composite durant l'effort, augmentant ainsi le nombre de contact fibres à fibres et diminuant ainsi la résistance électrique.

Ce débat a été clos lorsque ANGELIDIS, WEI et IRVING dans [21] ont montré que les études précédentes souffraient d'un biais expérimental et qu'une cause possible de la sensibilité piezorésistive négative trouvée précédemment est la qualité des contacts entre les fils de mesures et le composite. En effet l'équipe de ANGELIDIS, WEI et IRVING a refait les mesures avec deux types de pâte de contact entre composites et câbles de mesure, une à base d'argent et une à base de carbone. L'utilisation de pâte de carbone donne une sensibilité négative alors que la pâte d'argent donne une sensibilité positive. Les résultats obtenus ont été confirmés par une correspondance entre les deux équipes [22, 23]. Il est aussi bon de noter que les auteurs de [18] ont refait leur mesures sur des composites commerciaux [24], et ont trouvé les mêmes résultats que l'équipe de ANGELIDIS, WEI et IRVING. Ce débat a donc montré le soin qu'il faut apporter lors de la mesure à la qualité des contacts entre les sondes de mesures et le composite.

En outre, la mesure de la sensibilité piezorésistive dans un composite est assez complexe car le composite est à la fois anisotrope mécaniquement et électriquement. il convient de préciser la direction de la mesure électrique et de l'effort. Ainsi, on peut, comme dans [24], distinguer quatre cas différents pour une plaque, selon que la contrainte et la mesure est parallèle ou perpendiculaire au sens des fibres. La sensibilité piezorésistive doit donc être considérée comme une grandeur anisotrope, chacune des composantes du tenseur apportant une partie des informations sur les contraintes internes. De plus, il faudra bien différencier le comportement en traction, en compression [25, 26] et en cisaillement [27]; les deux derniers cas de contraintes ayant donné lieu à peu de littérature.

Le comportement est encore plus complexe dans le cas où le matériau composite est multicouche [28]. La sensibilité piezorésistive n'est pas la moyenne des deux couches, car les interactions de surface entre couches modifient de manière sensible cette quantité. En outre, dans le cas des composites à plusieurs couches, l'effet de réaligement des fibres sous l'effet de la contrainte peut devenir dominant [29]. Le rôle du type de tissage est aussi très mal étudié. Certains types de mailles se resserrant à la traction, il est possible que la résistance totale puisse diminuer sous la contrainte.

Il convient de remarquer que, comme dans toute mesure de piézorésistance, la température a une influence non négligeable sur la mesure résistive [10, 30–38]. Il faut donc bien prendre garde lors de la mesure soit de compenser les variations de température à l'aide d'un circuit ad-hoc [39], soit d'effectuer une calibration. De même et plus gênant la présence d'eau captive dans le composite a une grande influence sur les caractéristiques électriques et peut empêcher la mesure [40]. Notons que comme la variation de résistance est faible, un grand soin doit être apporté à la qualité de la mesure résistive [20]. En particulier il convient d'effectuer les mesures à l'aide de la mesure dite des quatre points [41].

Il est aussi possible d'améliorer la sensibilité de détection des composites et mémoriser la contrainte maximale subie en utilisant un ajustement spécial des fibres [42] ou encore en utilisant à la place du carbone des fibres SiC [43, 44]. Ces dernières sont plus adaptées à la conception de capteur car elles peuvent être facilement oxydées en surface, ce qui rend un composite à base de ces fibres très anisotrope électriquement [45]. Néanmoins, ces aménagements sont difficilement industrialisables.

L'effet de la foudre sur ce type de matériaux a aussi été étudié [46]. Le foudroiement se traduit par une augmentation sensible de la conductivité électrique. En effet, la foudre pyrolyse la résine et les fibres, transformant ainsi de grandes régions du composite en graphite qui est un excellent conducteur électrique.

### 3.2.3 Conclusion

Au travers de cette courte étude bibliographique, il apparaît :

- Que les composites de carbone possèdent un comportement piezorésistif. Ce comportement est plus complexe que dans le cas métallique, mais il peut être utilisé par exemple pour déterminer l'état des contraintes à l'intérieur d'un matériau composite.

- Les caractéristiques électriques des composites carbone sont très variables et peuvent, selon le type de composite, varier de plus d'un ordre de grandeur.
- Il existe au sein d'un même composite des fortes dispersion de fabrication et donc de caractéristiques mécaniques/électriques.

Il apparaît donc que la détection électrique des défauts semble possible mais qu'il fasse s'affranchir de la grande dispersion de caractéristiques électriques.

### 3.3 État de l'art des différentes méthodes de mesures électriques sur des composites carbonés

#### 3.3.1 Les mesures résistives

##### 3.3.1.1 Introduction

L'idée d'utiliser une mesure électrique résistive afin de détecter des défauts dans les composites carbonés n'est pas apparue pas de manière immédiate. Elle dérive de l'idée ancienne d'incorporer des senseurs de type fibre optique dans la structure en carbone et d'utiliser cette fibre comme capteur de contrainte [47–51]. Cette technique à base d'inclusion de fibres optiques, bien qu'utile au point de vue technique de laboratoire, souffre de plusieurs défauts [52] :

- Cette technique ne peut être appliquée à l'existant.
- La fibre optique peut diminuer dans certains cas les propriétés mécaniques de la pièce [53, 54].
- Il est quasiment impossible de réparer la fibre servant de capteur en cas de dommages (réparable) au niveau de la structure.
- La fibre optique se désolidarise petit à petit de la structure du composite, rendant la mesure non significative.

L'idée d'utiliser la fibre de carbone en elle-même comme détecteur de défaut ou de vieillissement est assez récente. Ce concept dit de *self sensing* ou de *matériaux intelligent* est tout d'abord apparût pour diagnostiquer les bétons et les ciments [55]<sup>①</sup> armés de fibres de carbone, puis a été généralisé au cas des matériaux de type aéronautique [18, 57, 58], afin de mesurer en temps réel les contraintes dans les structures.

L'idée de base est donc d'utiliser la conductivité du composite comme indicateur de sa santé. La rupture ou l'endommagement des fibres se traduira donc par une diminution globale de la conductivité du composite. La mesure est relativement simple et ne nécessite qu'un ohmmètre de précision [58].

##### 3.3.1.2 Quelques résultats expérimentaux

La mesure de résistance permet de détecter la délamination sur des composites carbonés [52], en particulier il a été démontré expérimentalement que la résistance de part et d'autre de la surface varie de manière linéaire en fonction de la taille des délaminations (voir la figure 3.1a). De même, la résistance le long de la surface varie de façon quasi linéaire en fonction de la taille des délaminations (voir la figure 3.1b). Il est bon de remarquer que la forte anisotropie électrique des composites carbonés joue un grand rôle dans la détection de la délamination. En effet expérimentalement, un composite  $0^\circ/90^\circ$  possède une réponse différente<sup>②</sup> à la délamination qu'un composite  $90^\circ/0^\circ$  [59, 60]. Il convient de noter que la sensibilité de la détection de la délamination dépend de la fraction volumique en fibres [61] ; dans tous les cas la variation des paramètres électriques à cause de la délamination est de l'ordre du pour cent [5], et nécessite donc une instrumentation de précision.

Cette méthode permet, de manière plus générale, de détecter les impacts [62]. Les résultats très visuels de cette carte de résistivité suite à quatre impacts sont reproduits sur la figure 3.2.

---

<sup>①</sup> Les résultats sur les bétons sont d'ailleurs assez prometteurs en particulier pour évaluer l'état des structures après un tremblement de terre. En outre la sensibilité piezorésistive est très grande [56], ce qui garantis une très bonne mesure.

<sup>②</sup> L'axe des fibres est bien entendue relatif au capteur.

### 3.3. ÉTAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURES ÉLECTRIQUES SUR DES COMPOSITES

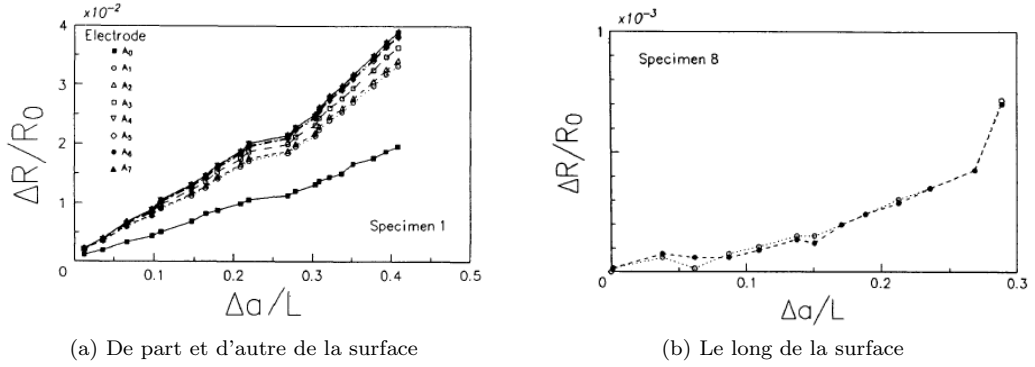


FIG. 3.1: Variation de la résistance électrique relative ( $\Delta R/R$ ) en fonction de la variation de taille relative des délaminations ( $\Delta a/L$ ) [52]. Les différentes courbes correspondent à l'éloignement entre le point de mesure et la source.

Ces résultats sont confirmés par [63–72] et ont été approfondis en particulier afin de déterminer la sensibilité de la mesure en fonction de l'espacement et du nombre d'électrodes [73, 74], ou de la forme et du type de délamination et d'impact [75]. Ces résultats obtenus pour des dommages liés à l'impact peuvent être transposés à des dommages liés à un fléchissement trop important [76] ou dans le cas de composites non plans par exemple cylindriques [77].

La méthode résistive permet aussi d'étudier la phase de fatigue initiale (ou de déverminage) [78], pour des composites carbone-carbone, carbone-epoxy et carbone-ciment. Les auteurs de cette étude montrent que les composites subissent une variation importante de la résistivité lors de la première dizaine de cycles, puis suivent une loi de fatigue linéaire<sup>①</sup> lors des cycles suivants. Ce type d'étude peut permettre d'étudier les premiers cycles de vie d'une pièce en carbone, et vérifier si la pièce n'a pas de trop grandes contraintes internes liées à la fabrication. Dans le même ordre d'idée, la méthode résistive permet aussi d'étudier les contraintes internes [79].

Les premières études expérimentales du phénomène de fatigue à l'aide de la méthode résistive ont été effectuées par l'équipe de SCHULTE dans [13, 80, 81]. Les auteurs montrent que la fatigue peut être analysée de manière efficace par une mesure électrique, et permet en particulier d'anticiper le phénomène de mort subite du composite. L'étude du comportement de la fibre de carbone tout au long de la durée de vie a été étudiée dans [82] puis complétée dans [83]. Les auteurs ont tout d'abord étudié la réaction à la fatigue d'une fibre de carbone seule [83]. Pour les composites de type epoxy-carbone unidirectionnel [82–84], la corrélation entre le phénomène de fatigue et la variation de résistance est flagrante (voir la figure 3.3). L'expérimentation sur un composite carbone-carbone [56, 83] est moins spectaculaire car la variation de résistivité, bien que corrélée au phénomène de fatigue, s'accroît de manière linéaire tout le long de la vie du matériau.

L'expérience a été refaite par la même équipe pour des composites carbonés à matrice epoxy de type 0°/90° [28, 85]. La méthode électrique permet encore une fois de détecter les problèmes de fatigue, en particulier les délaminations partielles (voir la figure 3.4), qui s'accompagnent d'un brusque saut de résistivité<sup>②</sup>. Ces résultats ont été confirmés par [17, 86], démontrant que l'effet de la piézorésistivité seule est négligeable devant le phénomène de rupture des fibres et de délamination.

L'article [16] de CEYSSON, SALVIA et VINCENT, compare la méthode de détection par résistivité avec la détection par ultrason dans le cas de la détection des pièces fatiguées. Sur des fibres unidirectionnelles, la méthode électrique est plus sensible, avec en particulier un saut de résistivité lors de la première rupture (voir la figure 3.5a). Sur des composites de type  $\pm 45^\circ$  la méthode résistive permet un meilleur suivi de la phase initiale des dommages. On peut distinguer dans ce dernier cas trois temps caractéristiques durant la vie de ce type de composite (voir figure 3.5b) :

<sup>①</sup>Par linéaire nous entendons que la sensibilité piezorésistive suit une loi linéaire en fonction du nombre de cycles.

<sup>②</sup>La délamination diminue le contact entre fibres et donc augmente logiquement la résistivité.



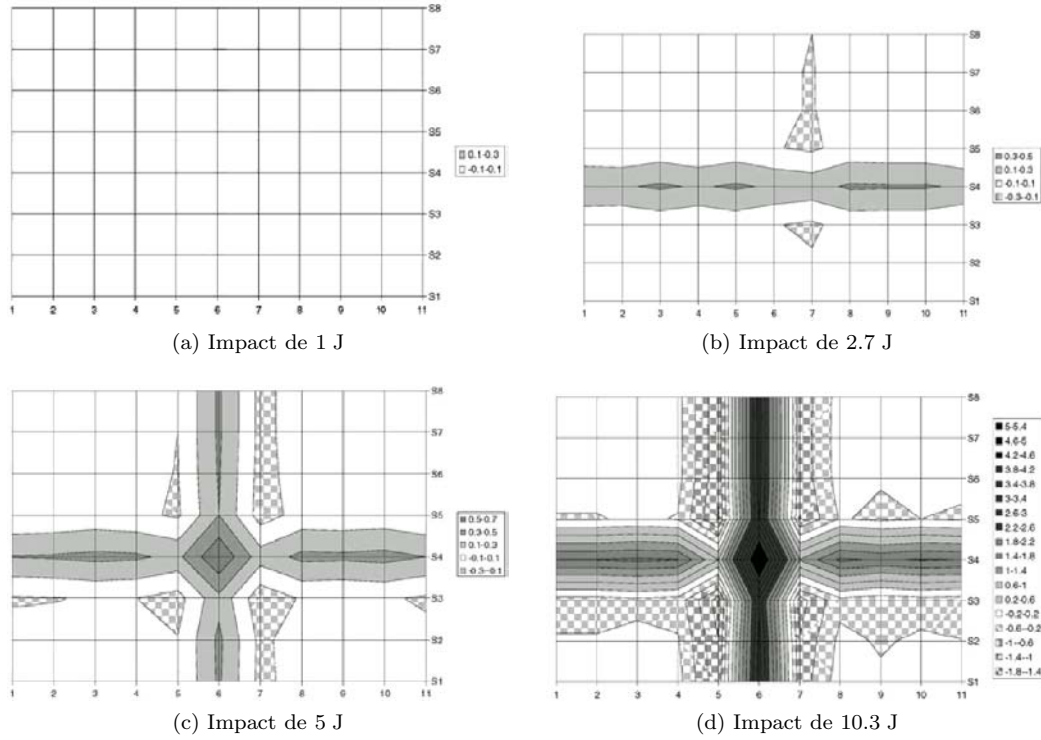


FIG. 3.2: Carte de résistivité après quatre impacts d'énergie différentes sur une plaque de composite carbone. L'échelle de couleur représentant la variation absolue de résistance [62]. Le quadrillage correspond à 1 cm.

- La zone I correspond au phénomène de regroupement des fissures dans le matériau. La résistance évolue de manière non linéaire.
- La zone II correspond à la création de zone de délamination et propagation de fissure transverse. La résistance évolue de manière plus linéaire.
- La zone III correspond à la phase postérieure à l'ouverture des délaminations. La résistance varie peu.

Ces résultats ont été reproduits avec succès dans [87].

Les résultats précédents ont été effectués en courant continu ; il est aussi possible d'effectuer des mesures en alternatif (AC). Il convient de noter que le comportement du carbone est plutôt capacitif [88]. Les mesures de résistivité et de capacité (à 100 kHz) sont bien corrélées à l'état général du matériau (voir la figure 3.6a) ; la capacité permet de détecter de manière plus fine les fractures dans la résine ou les problèmes de délaminations en apportant une information supplémentaire. Ces résultats sont confirmés par [89] qui fournit en plus une mesure de l'angle de perte à 1 MHz<sup>①</sup> (voir la figure 3.6b).

Au point de vue industriel, à notre connaissance, cette méthode n'a pas été beaucoup utilisée. Les seules applications à des cas industriels de cette méthode sont

- une étude de faisabilité afin d'étudier la réalisation de réservoir cryogénique intelligent basé sur une mesure temps réel de résistivité de la fibre de carbone [90, 91]. En effet, sur ce genre de structure remplie bien souvent de gaz explosifs, la présence de défauts peut avoir des conséquences dramatiques.
- quelques études particulières afin de détecter les défauts au niveau des trous traversants [92, 93], et en particulier la délamination naissant au niveau du trou dans le cas d'effort. C'est-à-dire les défauts du type du vol *American Airline 587*.

<sup>①</sup> Les auteurs note la quantité  $\tan \delta$  par la lettre  $D$ .

### 3.3. ÉTAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURES ÉLECTRIQUES SUR DES COMPOS

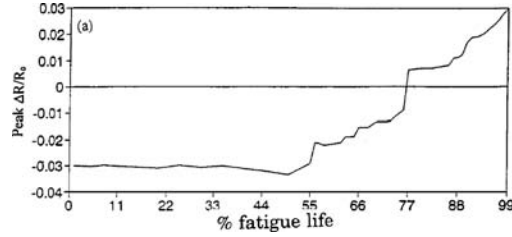


FIG. 3.3: Évolution de la résistance en fonction de la durée de vie d'un composite epoxy-carbone unidirectionnel [83]

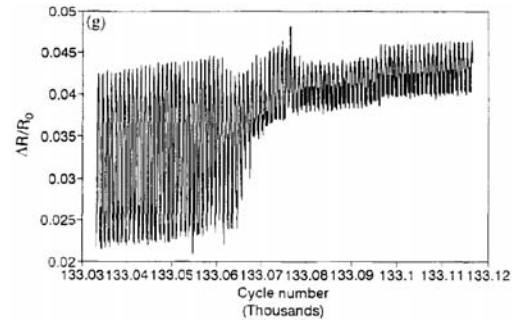


FIG. 3.4: Évolution de la résistance relative ( $\Delta R/R$  en fonction de la durée de vie d'un composite epoxy-carbone 0°/90°. Saut de resistivité lors du phénomène de délamination partielle [85].

#### 3.3.2 Les méthodes dites potentielles

Les mesures potentielles sont basées sur le même principe physique que la mesure résistive. Elle sont donc basées sur une modification de la résistance électrique du composite lors de la présence de défauts.

Cependant, leur mise en œuvre diffère, alors que la mesure résistive est basée sur la mesure de la résistance locale du composite, la méthode potentielle consiste à faire circuler un courant dans une pièce en composite et de mesurer les lignes de potentiel électrique. Les lignes de potentiel sont bien entendu, fortement dépendantes de la la résistance électrique locale, qui elle-même dépend, comme nous l'avons vu précédemment de la présence de défauts. La mesure potentielle est néanmoins plus facile à mettre en œuvre que la méthode résistive. En effet, au lieu d'utiliser une source de courant et une mesure de tension par point spatial de mesure, il suffit d'utiliser une seule source de courant. En outre, il est possible en perdant de la précision lors de la mesure, d'utiliser une pointe à touche pour la mesure au lieu de souder les capteurs, ce qui bien entendu simplifie la mesure.

La majorité des résultats obtenus dans le cadre de la méthode résistive sont bien entendu transposables à la méthode des potentiels [6, 94, 95]. Un résultat particulièrement visuel de ce type de méthode est donné par la figure 3.7; il convient de noter qu'il est alors possible de visualiser le tissu de fibres de carbone.

#### 3.3.3 Les méthodes à base de courants de Foucault

##### 3.3.3.1 Introduction

Les méthodes précédentes sont des méthodes basses fréquences et nécessitent donc un contact électrique entre la source de courant et l'échantillon. La méthode basée sur les courants de Foucault consiste à utiliser un courant moyenne fréquence afin de créer dans le composite un courant induit. Les défauts éventuels de la structure modifient les lignes de courants et changent donc l'impédance de la bobine. Le mécanisme à l'oeuvre peut se décomposer en trois phases :

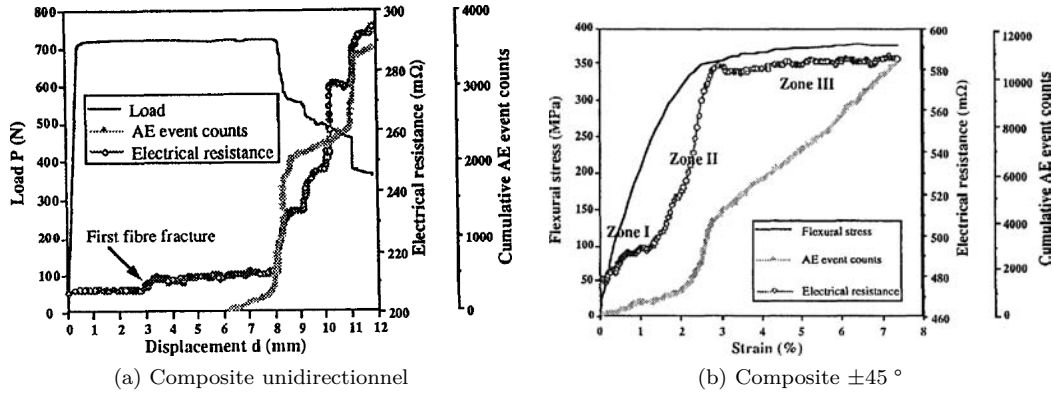


FIG. 3.5: Comparaison des méthode acoustique (AE) par rapport à la méthode résistive sur deux types de composites carbone [16]

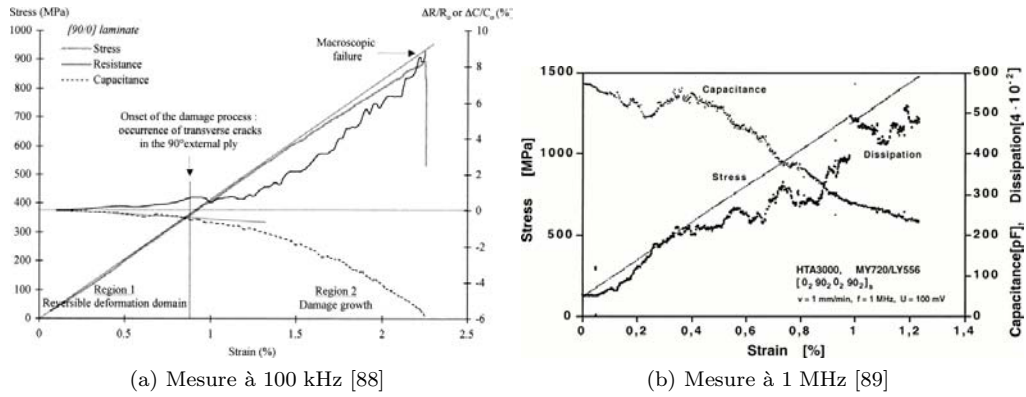


FIG. 3.6: Variation de la résistivité et de la capacitance en fonction de l'élongation. Corrélation avec les dommages.

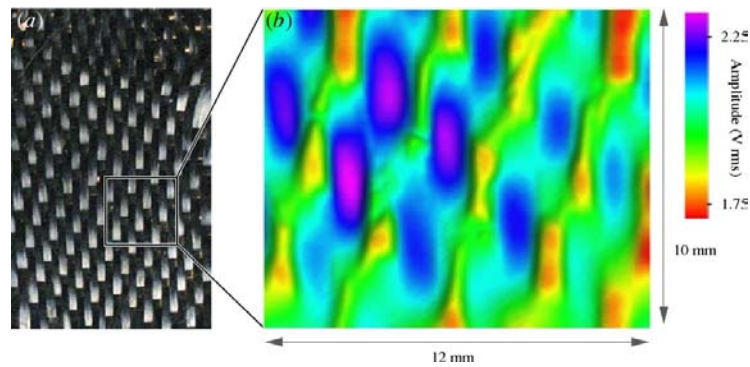


FIG. 3.7: Détail de la carte des potentiels d'un composite carbone (b) comparé à son image visuelle [95].

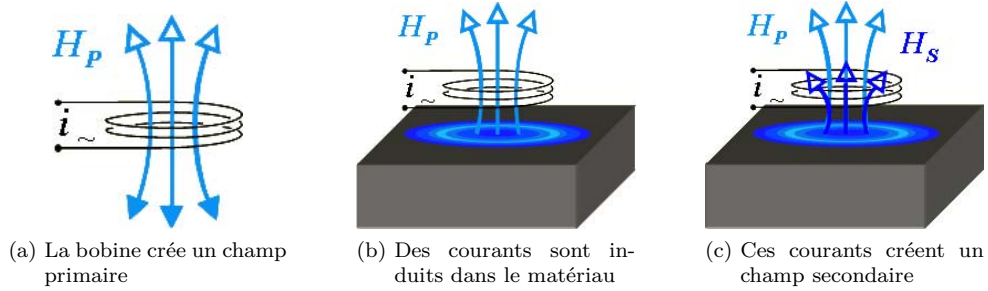


FIG. 3.8: Schéma de principe de la mesure par les courants de Foucault [96]

1. Une bobine crée un champ magnétique (primaire).
2. Dans le matériau conducteur, ce champ crée un courant induit dans le matériau conducteur.
3. En retour, ce courant crée son propre champ magnétique (secondaire) qui se superpose avec le champs ce qui change l'impédance de la bobine.

Les différentes phases de ce processus sont explicitées dans la figure 3.8.

Cette méthode est utilisée avec succès dans les cas des défauts dans les matériaux métalliques [97] et représente même le standard de contrôle pour les tubes métalliques. Elle permet, par exemple, de détecter dans ces matériaux les fractures et les craquelures.

Cependant dans le cas des matériaux composites du fait de leur faible conductivité comparée aux métaux, elle est beaucoup moins efficace. En effet, les pertes résistives sont alors beaucoup plus importantes diminuant ainsi la sensibilité. En outre, ce type de méthode est très sensible à l'état de surface du matériau. Malheureusement dans le cas d'un composite cet état de surface est très irrégulier du fait que le matériau est fabriqué à partir de tissus. Il est néanmoins possible d'obtenir des résultats significatifs à l'aide de cette méthode comme les exemples suivants le prouvent.

### 3.3.3.2 Quelques exemples

Diverses études montrent que ce genre de méthode peut détecter des impacts ou des délaminations sur un composite cellulaire [9, 98–102]. Il convient de noter que les dégâts liés à la matrice ou au nid d'abeille ne sont pas détectés par ce genre de méthodes [9] car ces deux composants ne sont pas conducteurs électriques. De ce fait, les dommages thermiques, par exemple, se traduisant par une destruction de la matrice, ne sont pas détectables [101] à l'aide de la méthode des courants de FOUCAULT.

En outre, les courants de FOUCAULT sont essentiellement surfaciques. Pour les composites épais, il est donc nécessaire pour des questions de pénétration que la fréquence soit basse. Malheureusement, il n'est pas possible alors de générer de forts courants du fait de la faible conductivité relative des composites. Une solution possible pour améliorer la sensibilité est alors d'utiliser des SQUID<sup>①</sup>. Cette approche est développée dans les articles [104–111]. Néanmoins, bien que très sensible ce dispositif est très cher ; en effet il faut maintenir le squid superconducteur c'est-à-dire à température cryogénique avec les coûts que cela implique.

Une méthode bas coût basée sur une matrice de fils a donné de bons résultats expérimentaux et permet de détecter des défauts correspondant à de faibles impacts (aux environs de 4 J) [112] ou encore des défauts dus à la foudre [113, 114]. Cette technique fait l'objet de brevets internationaux [115–117].

Une comparaison des méthodes ultrasonores et des méthodes par courant de FOUCAULT est donnée par [118, 119]. Les méthodes de type de Courant de FOUCAULT sont plus intéressantes économiquement mais souffrent d'une résolution spatiale plus faible que les méthodes à base d'ultrasons. Cependant les méthodes à base de courant de FOUCAULT ne nécessitent pas de créer

<sup>①</sup>Ou encore *Superconducting quantum interface device*, un type de magnétomètre très sensible basé sur des boucles superconductrices contenant une jonction Josephson [103].

un contact mécanique entre la pièce à mesurer et l'instrument de mesure, facilitant ainsi leurs mise en œuvre.

### 3.3.4 Traitement du signal et évaluation des dommages

Les méthodes précédentes permettent de mesurer des paramètres électriques et leur variation. Cette variation étant faible, il convient donc de traiter le signal et d'évaluer l'état du composite sous test. Cette rubrique ne se veut pas exhaustive mais permet juste de donner quelques pistes pour évaluer les dommages.

Une des méthodes génériques utilisées dans l'évaluation des dommages, consiste à utiliser un réseau de neurones qui après entraînement donnera le résultat souhaité. Ce type de méthode a été utilisé de nombreuses fois dans le cadre de la détection de défaut dans le carbone [52, 120, 121]. Il a pour inconvénient majeur d'être empirique et de ne pas se baser directement sur la physique du processus.

D'autres stratégies comme l'utilisation de la méthodologie des surfaces de réponses [122] ont été aussi essayées avec succès [123–127]. Un des avantages de la méthodologie des surfaces de réponses est qu'elle ne nécessite pas de connaissance sur la nature des pièces abimées [128].

## 3.4 Introduction aux méthodes de mesure radiofréquences

Le but de cette section est de donner un rapide aperçu des méthodes radiofréquences permettant de déterminer les caractéristiques des matériaux et ainsi fournir un état de l'art et une introduction des concepts développés dans le chapitre suivant.

### 3.4.1 Propagation des ondes

Les ondes électromagnétiques sont définies par les équations de Maxwell. Pour rappel ces équations sont dans le cas d'un milieu isotrope linéaire :

$$\nabla \times \vec{\mathcal{E}} = -\mu \frac{\partial \vec{\mathcal{H}}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{\mathcal{E}} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{\mathcal{H}} = \sigma \vec{\mathcal{E}} + \varepsilon \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{\mathcal{H}} = 0 \quad (3.4)$$

Avec  $\vec{\mathcal{E}}$ ,  $\vec{\mathcal{H}}$  les champs électrique et magnétique temporel,  $\rho, \mu, \varepsilon$ , respectivement la conductivité électrique, la permittivité électrique et la perméabilité magnétique, et  $t$  le temps.

Soit en régime harmonique temporel, en notant  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  les champs harmoniques électrique et magnétique et  $j^2 = -1$  :

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\varepsilon\vec{E} \quad \nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.6)$$

L'influence du matériau transparaît au travers des constantes spécifiques que sont  $\rho, \mu, \varepsilon$ , respectivement la conductivité électrique, la permittivité électrique et la perméabilité magnétique. Bien souvent (et c'est le cas du carbone), le matériau n'est pas magnétique et  $\mu$  est égal à la perméabilité du vide ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ ). Il est possible, afin de simplifier l'analyse, de regrouper à une fréquence donnée  $\sigma$  et  $\varepsilon$  en une seule permittivité équivalente complexe, simplifiant ainsi l'analyse du système de Maxwell :

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (3.7)$$

Très souvent l'onde est créée à l'extérieur du matériau par une antenne, il naît donc une onde réfléchie et une onde transmise au travers du matériau. Ces deux ondes sont suffisantes pour mesurer et déterminer les paramètres électriques ( $\mu$  et  $\varepsilon^*$ ) du matériel sous test. La grande force des méthodes microondes est qu'elles sont sans contact et rapides à mettre en œuvre.

### 3.4.2 Quelques applications et exemples dans le domaine des matériaux

Les mesures radiofréquences sont utilisées en agro-alimentaire pour déterminer la masse d'eau dans le blé et ainsi permettre de payer au prix juste l'agriculteur [129]. Il est aussi possible d'utiliser des capteurs radiofréquences afin de connaître le degré d'humidité de la patte à papier sortant du four et ainsi optimiser le séchage du papier et les coûts énergétiques [130].

Les capteurs radiofréquences ont aussi été utilisés dans la détection de défauts. Il est ainsi possible par exemple de détecter des fissures de l'ordre du micromètre [131] dans des échantillons métalliques, afin par exemple de détecter des défauts dans des cuves de réacteurs nucléaires. D'autres exemples d'applications peuvent être trouvés, comme par exemple, la détection de la délamination dans les composites en fibre de verre [132].

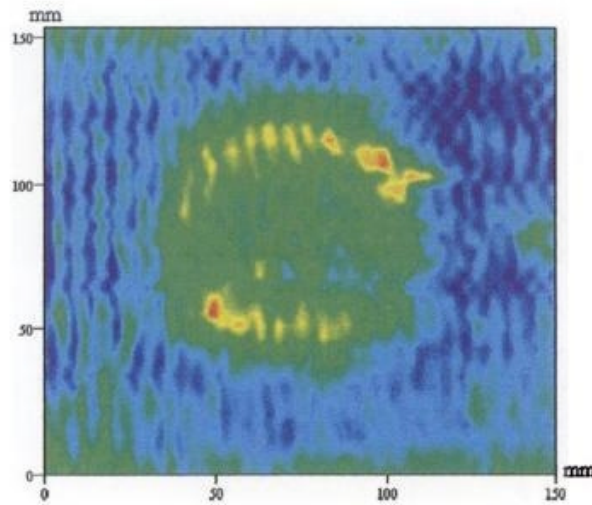


FIG. 3.9: Image en fausse couleur d'un composite de fibre de verre avec une delamination au centre. Mesure en réflexion [132]

Dans le domaine du biologique, les mesures radiofréquences sont utilisées afin d'étudier les cancers et de fournir des moyens automatiques de les détecter à partir de prélèvement [133]. Des méthodes de détection de cancer du sein à base de capteur RF sont aussi en cours d'étude [134, 135]. Un essai clinique sur une poitrine saine de femme est visible sur la figure 3.10.

## 3.5 Conclusion

Les méthodes à base de mesures électriques sont efficaces pour détecter des défauts dans les peaux carbone. Malheureusement elle souffrent de plusieurs imperfections :

- La nécessité de disposer d'un grand nombre de plot de contacts. Des solutions [136] permettent de diviser par deux le nombre de contacts mais ne résolvent pas le problème de base. D'autres auteurs contournent la difficulté en utilisant les rivets comme électrodes [137], néanmoins cette solution n'apparaît pas viable, car les rivets sont de moins en moins utilisés pour le montage de pièces composites.
- La nécessité d'avoir de bon contact en particulier en présence d'humidité [138], ou de stress mécanique.

Bien que la méthode électrique soit non destructive la présence de contact rend cette méthode peu pratique sur de l'analyse in situ, car il est nécessaire de préparer soigneusement la pièce. Les méthodes radiofréquences ont été utilisées dans le cas des composites en fibre de verre, mais leur développement aux composites en carbone est un domaine de recherche balbutiant.



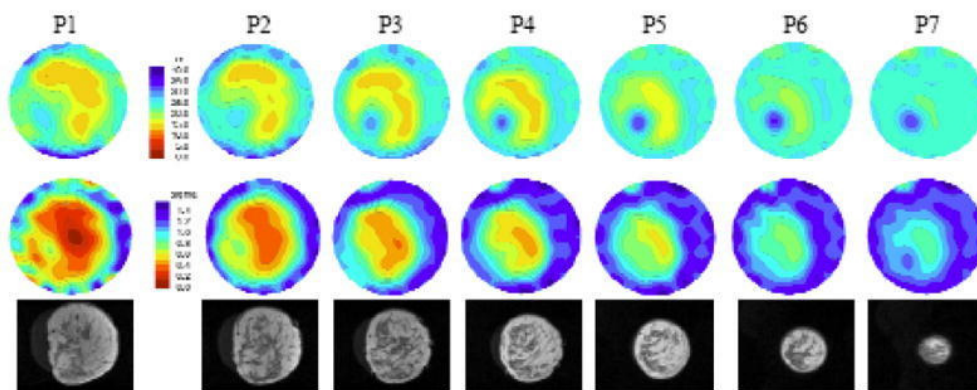


FIG. 3.10: Coupes anatomiques effectuées par un capteur microondes (en haut permittivité, milieu conductivité) et image par IRM d'un sein droit d'une femme. Échelle identique pour chaque image [135].

### 3.6 Bibliographie

- [1] P. C. CONOR et C. N. OWSTON. « Electrical resistance of single carbon fibres ». Dans : *Nature* 223.5211 (1969), p. 1146–1147. ISSN : 0028-0836. DOI : 10.1038/2231146b0. Cf. p. 24.
- [2] A. S. KADDOUR, F. A. R. AL-SALEHI et S. T. S. AL-HASSANI. « Electrical Resistance Measurement Technique for Detecting Failure in CFRP Materials at High Strain Rates ». Dans : *Composites Science and Technology* 51.3 (1994), p. 377–385. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/0266-3538(94)90107-4. Cf. p. 24.
- [3] J. FERNANDES-NASCIMENTO et al. « Anisotropy of electrical conductivity and structure in polymer-carbon fiber composite materials ». Anglais. Dans : *Polymer Composites* 16.2 (1995), p. 109–113. ISSN : 0272-8397. DOI : 10.1002/pc.750160202. Cf. p. 24.
- [4] T. A. EZQUERRA et al. « Alternating-current electrical properties of graphite, carbon-black and carbon-fiber polymeric composites ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 903–909. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00176-7. Cf. p. 24.
- [5] Masahito UEDA et Akira TODOROKI. « Delamination monitoring of CFRP laminate using the two-stage electric potential change method with equivalent electric conductivity ». Dans : *Engineering Fracture Mechanics* 75.9 (juin 2008), p. 2737–2750. ISSN : 0013-7944. DOI : 10.1016/j.engfracmech.2007.03.011. Cf. p. 24, 26.
- [6] L. C. MASSON et P. E. IRVING. « Comparison of experimental and simulation studies of location of impact damage in polymer composites using electrical potential techniques ». Dans : *Fifth European Conference on Smart Structures and Materials*. Éd. par Pierre François GOBIN et Clifford M. FRIEND. T. 4073. SPIE, 2000, p. 182–193. ISBN : 0-8194-3710-7. DOI : 10.1117/12.396399. Cf. p. 24, 29.
- [7] M. H. CHOI, B. H. JEON et I. J. CHUNG. « The effect of coupling agent on electrical and mechanical properties of carbon fiber/phenolic resin composites ». Dans : *Polymer* 41.9 (avr. 2000), p. 3243–3252. ISSN : 0032-3861. DOI : 10.1016/S0032-3861(99)00532-7. Cf. p. 24.
- [8] M. LOUIS, S. P. JOSHI et W. BROCKMANN. « An experimental investigation of through-thickness electrical resistivity of CFRP laminates ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 911–919. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00177-9. Cf. p. 24.

- [9] M. P. DE GOEJE et K. E. D. WAPENAAR. « Non-destructive inspection of carbon fibre-reinforced plastics using eddy current methods ». Dans : *Composites* 23.3 (mai 1992), p. 147–157. ISSN : 0010-4361. DOI : 10.1016/0010-4361(92)90435-W. Cf. p. 24, 31.
- [10] C. Q. YANG, Z. S. WU et H. HUANG. « Electrical properties of different types of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) and hybrid CFRPs ». Dans : *Carbon* 45.15 (2007), p. 3027–3035. ISSN : 0008-6223. DOI : 10.1016/j.carbon.2007.09.001. Cf. p. 24, 25.
- [11] William M. BANKS et al. « Dielectric and mechanical assessment of water ingress into carbon fibre composite materials ». Dans : *Computers & Structures* 76.1 (mai 2000), p. 43–55. ISSN : 0045-7949. DOI : 10.1016/S0045-7949(99)00145-5. Cf. p. 24.
- [12] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Gauge factor*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gauge\\_factor](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gauge_factor) (visité le 31/10/2007). Cf. p. 24.
- [13] Ch. BARON et K. SCHULTE. « Elektrische Widerstandsmessung zur in-situ Bestimmung des Faserversagens in CFK-Laminaten ». Dans : *Materialprüfung* 30.11-12 (1988), p. 361–365. ISSN : 0025-5300. Cf. p. 24, 27.
- [14] Norio MUTO et al. « Preventing Fatal Fractures in Carbon-Fiber-Glass-Fiber-Reinforced Plastic Composites by Monitoring Change in Electrical Resistance ». Dans : *Journal of the American Ceramic Society* 76.4 (avr. 1993), p. 875–879. ISSN : 0002-7820. DOI : 10.1111/j.1151-2916.1993.tb05309.x. Cf. p. 24.
- [15] Mei Xuan XU et al. « Correlation of change in electrical resistance with strain of carbon fiber-reinforced plastic in tension ». Dans : *Journal of Applied Polymer Science* 60.10 (mai 1996), p. 1595–1599. ISSN : 0021-8995. DOI : 10.1002/(SICI)1097-4628(19960606)60%3A10%3C1595%3A%3AAID-APP11%3E3.0.CO%3B2-4. Cf. p. 24.
- [16] O. CEYSSON, M. SALVIA et L. VINCENT. « Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis ». Dans : *Scripta materialia* 34.8 (avr. 1996), p. 1273–1280. ISSN : 1359-6462. DOI : 10.1016/1359-6462(95)00638-9. Cf. p. 24, 27, 30.
- [17] P. E. IRVING et C. THIAGARAJAN. « Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique ». Dans : *Smart Materials and Structures* 7.4 (avr. 1998), p. 456–466. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/7/4/004. Cf. p. 24, 27.
- [18] Xiaojun WANG et D. D. L. CHUNG. « Continuous carbon fibre epoxy-matrix composite as a sensor of its own strain ». Dans : *Smart Materials and Structures* 5.6 (déc. 1996), p. 796–800. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/5/6/009. Cf. p. 25, 26.
- [19] Xiaoping SHUI et D. D. L. CHUNG. « A piezoresistive carbon filament polymer-matrix composite strain sensor ». Dans : *Smart Materials and Structures* 5.2 (1996), p. 243–246. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/5/2/014. Cf. p. 25.
- [20] Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix composite ». Dans : *Polymer Composites* 21.1 (fév. 2000), p. 13–19. ISSN : 0272-8397. DOI : 10.1002/pc.10160. Cf. p. 25.
- [21] N. ANGELIDIS, C. Y. WEI et P. E. IRVING. « The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain ». Dans : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 35.10 (oct. 2004), p. 1135–1147. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2004.03.020. Cf. p. 25.
- [22] D. D. L. CHUNG et S. WANG. « Discussion on paper : ‘The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain’ by N. Angelidis, CY Wei and PE Irving, *Composites : Part A* 35, 1135–1147 (2004) ». Dans : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 37.9 (2006), p. 1490–1494. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2005.05.041. Cf. p. 25.
- [23] N. ANGELIDIS, C. Y. WEI et P. E. IRVING. « Response to discussion of paper : The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain ». Dans : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 37.9 (sept. 2006), p. 1495–1499. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2005.11.003. Cf. p. 25.



- [24] Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Negative piezoresistivity in continuous carbon fiber epoxy-matrix composite ». Dans : *Journal of Materials Science* 42.13 (juil. 2007), p. 4987–4995. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1007/s10853-006-0580-z. Cf. p. 25.
- [25] Xiaojun WANG, Xuli FU et D. D. L. CHUNG. « Strain sensing using carbon fiber ». Dans : *Journal of Materials Research* 14.3 (mar. 1999), p. 790–802. ISSN : 0884-2914. DOI : 10.1557/JMR.1999.0105. Cf. p. 25.
- [26] Zhen MEI et al. « Mechanical damage and strain in carbon fiber thermoplastic-matrix composite, sensed by electrical resistivity measurement ». Dans : *Polymer Composites* 23.3 (juin 2002), p. 425–432. ISSN : 0272-8397. DOI : 10.1002/pc.10444. Cf. p. 25.
- [27] Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Interlaminar shear in carbon fiber polymer-matrix composites, studied by measuring the contact electrical resistance of the interlaminar interface during shear ». Dans : *Composite Interfaces* 6.6 (1999), p. 507–517. ISSN : 0927-6440. Cf. p. 25.
- [28] Xiaojun WANG et D. D. L. CHUNG. « Self-monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite ». Dans : *Composites. Part B, Engineering* 29.1 (jan. 1998), p. 63–73. ISSN : 1359-8368. DOI : 10.1016/S1359-8368(97)00014-0. Cf. p. 25, 27.
- [29] Dwayne A. GORDON, Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Piezoresistivity in unidirectional continuous carbon fiber polymer-matrix composites : single-lamina composite versus two-lamina composite ». Dans : *Composite Interfaces* 11.1 (jan. 2004), p. 95–103. ISSN : 0927-6440. DOI : 10.1163/156855404322681073. Cf. p. 25.
- [30] S. WANG et D. D. L. CHUNG. « Thermal fatigue in carbon fibre polymer-matrix composites, monitored in real time by electrical resistance measurements ». Dans : *Polymers and Polymer Composites* 9.2 (2001), p. 135–140. ISSN : 1478-2391. Cf. p. 25.
- [31] D. D. L. CHUNG et S. WANG. « Carbon fiber polymer-matrix composite interfaces as thermocouple junctions ». Dans : *Composite Interfaces* 6.6 (1999), p. 519–529. ISSN : 0927-6440. Cf. p. 25.
- [32] Shoukai WANG, Daniel P. KOWALIK et D. D. L. CHUNG. « Effects of the Temperature, Humidity and Stress on the Interlaminar Interface of Carbon Fiber Polymer-Matrix Composites, Studied by Contact Electrical Resistivity Measurement ». Dans : *The Journal of Adhesion* 78.2 (2002), p. 189–200. ISSN : 0021-8464. DOI : 10.1080/00218460210384. Cf. p. 25.
- [33] Zhen MEI et D. D. L. CHUNG. « Thermal stress-induced thermoplastic composite debonding, studied by contact electrical resistance measurement ». Dans : *International Journal of Adhesion and Adhesives* 20.2 (2000), p. 135–139. ISSN : 0143-7496. DOI : 10.1016/S0143-7496(99)00026-3. Cf. p. 25.
- [34] Victor H. GUERRERO et D. D. L. CHUNG. « Interlaminar interface relaxation upon heating carbon fiber thermoplastic-matrix composite, studied by contact electrical resistivity measurement ». Dans : *Composite Interfaces* 9.6 (2002), p. 557–563. ISSN : 0927-6440. DOI : 10.1163/15685540260494128. Cf. p. 25.
- [35] Victor H. GUERRERO et D. D. L. CHUNG. « Enhancement of the absolute thermoelectric power of carbon fiber polymer-matrix composite in the through-thickness direction ». Dans : *Composite Interfaces* 9.4 (2002), p. 395–401. ISSN : 0927-6440. DOI : 10.1163/156855402760194737. Cf. p. 25.
- [36] D. D. L. CHUNG. « Thermal Analysis by Electrical Resistivity Measurement ». Dans : *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 65.1 (2001), p. 153–165. ISSN : 1388-6150. DOI : 10.1023/A:1011584803863. Cf. p. 25.
- [37] D. D. L. CHUNG. « Thermal analysis of carbon fiber polymer-matrix composites by electrical resistance measurement ». Dans : *Thermochimica Acta* 364.1 (2000), p. 121–132. ISSN : 0040-6031. DOI : 10.1016/S0040-6031(00)00631-6. Cf. p. 25.

- [38] Shoukai WANG, Zhen MEI et D. D. L. CHUNG. « Interlaminar damage in carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement ». Dans : *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21.6 (juin 2001), p. 465–471. ISSN : 0143-7496. DOI : 10.1016/S0143-7496(01)00023-9. Cf. p. 25.
- [39] Akira TODOROKI, Yuuki TANAKA et Yoshinobu SHIMAMURA. « Electric resistance Change method for Identification of Embedded Delamination of CFRP Plates Materials ». Dans : *Materials Science Research International Special Technical Publication* 2 (2001), p. 139–145. ISSN : 1341-1683. Cf. p. 25.
- [40] Yoshinobu SHIMAMURA et al. « Electrical impedance change method for moisture absorption monitoring of CFRP ». Dans : *Advanced Composite Materials* 13.3 (2004), p. 297–310. ISSN : 0924-3046. DOI : 10.1163/1568551042580145. Cf. p. 25.
- [41] J.G. WEBSTER. *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. Anglais. Boca Raton : CRC Press, 1999. ISBN : 0-8493-2145-X. Cf. p. 25.
- [42] Yoshiki OKUHARA et Hideaki MATSUBARA. « Memorizing maximum strain in carbon-fiber-reinforced plastic composites by measuring electrical resistance under pre-tensile stress ». Dans : *Composites Science and Technology* 65.14 (nov. 2005), p. 2148–2155. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2005.05.004. Cf. p. 25.
- [43] B. FANKHÄNEL et al. « Electrical properties and damage monitoring of SiC-fibre-reinforced glasses ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 825–830. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00185-8. Cf. p. 25.
- [44] B. FANKHÄNEL et al. « SiC-fibre reinforced glasses electrical properties and their application ». Dans : *Journal of the European Ceramic Society* 21.5 (mai 2001), p. 649–657. ISSN : 0955-2219. DOI : 10.1016/S0955-2219(00)00240-5. Cf. p. 25.
- [45] T. OGASAWARA et al. « Sensitive strain monitoring of SiC fiber/epoxy composite using electrical resistance changes ». Dans : *Composites Science and Technology* 67.6 (mai 2007), p. 955–962. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2006.06.013. Cf. p. 25.
- [46] Yuri CHEKANOV et al. « Electrical properties of epoxy resin filled with carbon fibers ». Dans : *Journal of Materials Science* 34.22 (nov. 1999), p. 5589–5592. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1023/A:1004737217503. Cf. p. 25.
- [47] B. HOFER. « Fibre optic damage detection in composite structures ». Dans : *15th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, (ICAS)*. T. 1. American Institute of Aeronautics et Astronautics, 1987, p. 135–143. ISBN : 0-93040316-9. Cf. p. 26.
- [48] S. R. WAITE et G. N. SAGE. « The failure of optical fibres embedded in composite materials ». Dans : *Composites* 19.4 (juil. 1988), p. 288–294. ISSN : 0010-4361. Cf. p. 26.
- [49] Rodney Alan BADCOCK et Gerad Franklyn FERNANDO. « An intensity-based optical fibre sensor for fatigue damage detection in advanced fibre-reinforced composites ». Dans : *Smart Materials and Structures* 4.4 (déc. 1995), p. 223–230. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/4/4/001. Cf. p. 26.
- [50] Chia-Chen CHANG et Jim SIRKIS. « Impact-Induced Damage of Laminated Graphite/Epoxy Composites Monitored Using Embedded In-Line Fiber Etalon Optic Sensors ». Dans : *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 8.10 (oct. 1997), p. 829–841. ISSN : 1045-389X. DOI : 10.1177/1045389X9700801003. Cf. p. 26.
- [51] Chia-Chen CHANG et James S SIRKIS. « Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection ». Dans : *Smart Materials and Structures* 7.2 (fév. 1998), p. 166–177. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/7/2/004. Cf. p. 26.
- [52] Akira TODOROKI, Hideo KOBAYASHI et Katsuya MATUURA. « Application of Electric Potential Method to Smart Composite Structures for Detecting Delamination ». Dans : *JSME international journal. Series A, Solid mechanics and material engineering* 38.4 (oct. 1995), p. 524–530. ISSN : 1344-7912. Cf. p. 26, 27, 32.

- [53] D. C. SEO et J. J. LEE. « The mechanical characteristics of smart composite structures with embedded optical fiber sensors ». Dans : *Composite structures* 32.1–4 (1995), p. 39–50. ISSN : 0263-8223. DOI : 10.1016/0263-8223(95)00038-0. Cf. p. 26.
- [54] D. C. SEO et J. J. LEE. « Effect of embedded optical fiber sensors on transverse crack spacing of smart composite structures ». Dans : *Composite structures* 32.1–4 (1995), p. 51–58. ISSN : 0263-8223. DOI : 10.1016/0263-8223(95)00039-9. Cf. p. 26.
- [55] Pu Woei CHEN et D. D. L. CHUNG. « Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection ». Dans : *Smart Materials and Structures* 2.1 (mar. 1993), p. 22–30. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/2/1/004. Cf. p. 26.
- [56] D. D. L. CHUNG. « Self-monitoring structural materials ». Dans : *Materials science and engineering : R : Reports* 22.2 (mar. 1998), p. 57–78. ISSN : 0927-796X. DOI : 10.1016/S0927-796X(97)00021-1. Cf. p. 26, 27.
- [57] Deborah D. L. CHUNG. « Composites get smart ». Dans : *Materials Today* 5.1 (jan. 2002), p. 30–35. ISSN : 1369-7021. DOI : 10.1016/S1369-7021(02)05140-4. Cf. p. 26.
- [58] Akira TODOROKI, Masahito UEDA et Yoshiyasu HIRANO. « Strain and Damage Monitoring of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistance Measurement ». Dans : *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 1.8 (août 2007), p. 947–974. ISSN : 1880-9871. DOI : 10.1299/jmmp.1.947. Cf. p. 26.
- [59] A. TODOROKI et H. SUZUKI. « Health monitoring of internal delamination cracks for graphite/epoxy composites by electric potential method ». Dans : *Smart Materials and Structures : Proceedings of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials in Conjunction with the 2nd International Conference on Micromechanics, Intelligent Materials, and Robotics*. Harrogate, United Kingdom : IOP, 1998, p. 429–434. ISBN : 0-7503-0547-9. Cf. p. 26, 38.
- [60] A. TODOROKI et H. SUZUKI. « Health monitoring of internal delamination cracks for graphite/epoxy composites by electric potential method ». Dans : *Applied Mechanics and Engineering* 5.1 (2000). Reimpression de [59], p. 238–294. ISSN : 1425-1655. Cf. p. 26.
- [61] Masahito UEDA et Akira TODOROKI. « Effect of Fiber Volume Fraction on Monitoring Delamination of CFRP Laminates with Electric Resistance Change Method ». Dans : *Key Engineering Materials* 270 (2004), p. 1335–1342. ISSN : 1013-9826. Cf. p. 26.
- [62] L. HOU et S. A. HAYES. « A resistance-based damage location sensor for carbon-fibre composites ». Dans : *Smart Materials and Structures* 11.6 (déc. 2002), p. 966–969. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/11/6/401. Cf. p. 26, 28.
- [63] N. J. WILLIAMSON, R. M. J. KEMP et P. T. CURTIS. « Development of self-sensing “smart” composites using electrical resistance properties ». Anglais. Dans : *6th International Conference on Fibre Reinforced Composites (FRC’94)*. Newcastle-upon-Tyne, United Kingdom 1994, p. 17.1–17.10. Cf. p. 27.
- [64] Shoukai WANG, D. D. L. CHUNG et Jaycee H. CHUNG. « Self-sensing of damage in carbon fiber polymer-matrix composite by measurement of the electrical resistance or potential away from the damaged region ». Dans : *Journal of Materials Science* 40.24 (déc. 2005), p. 6463–6472. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1007/s10853-005-1708-2. Cf. p. 27.
- [65] Shoukai WANG, D. D. L. CHUNG et Jaycee H. CHUNG. « Impact damage of carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement ». Dans : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 34.12 (déc. 2005), p. 1707–1715. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2005.03.005. Cf. p. 27.
- [66] N. ANGELIDIS, N. KHEMIRI et P. E. IRVING. « Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in CFRP laminates ». Dans : *Smart Materials and Structures* 14.1 (jan. 2005), p. 147–154. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/14/1/014. Cf. p. 27.

- [67] S. WANG, D. D. L. CHUNG et J. H. CHUNG. « Effects of composite lay-up configuration and thickness on the damage self-sensing behavior of carbon fiber polymer-matrix composite ». Dans : *Journal of Materials Science* 40.3 (mar. 2005), p. 561–568. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1007/s10853-005-6289-6. Cf. p. 27.
- [68] Ji Ho KANG et al. « Self-diagnosis of damage in fibrous composites using electrical resistance measurements ». Dans : *Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure V*. Éd. par Aftab MUFTI, Andrew GYEKENYESI et Peter SHULL. T. 6176. SPIE, 2006, p. 11–22. ISBN : 0-8194-6229-2. DOI : 10.1117/12.660286. Cf. p. 27.
- [69] D. WANG et al. « Sensitivity of the two-dimensional electric potential/resistance method for damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composite ». Dans : *Journal of Materials Science* 41.15 (déc. 2006), p. 4839–4846. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1007/s10853-006-0062-3. Cf. p. 27.
- [70] Daojun WANG et D. D. L. CHUNG. « Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon fiber polymer matrix composite ». Dans : *Smart Materials and Structures* 15.5 (août 2006), p. 1332–1344. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/15/5/023. Cf. p. 27.
- [71] Daojun WANG et al. « Comparison of the Electrical Resistance and Potential Techniques for the Self-sensing of Damage in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composites ». Dans : *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 17.10 (2006), p. 853–861. ISSN : 1045-389X. DOI : 10.1177/1045389X06060218. Cf. p. 27.
- [72] N. ANGELIDIS et P. E. IRVING. « Detection of impact damage in CFRP laminates by means of electrical potential techniques ». Dans : *Composites Science and Technology* 67.3-4 (mar. 2007), p. 594–604. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2006.07.033. Cf. p. 27.
- [73] A. TODOROKI et Y. TANAKA. « Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method ». Dans : *Composites Science and Technology* 62.5 (2002), p. 629–639. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(02)00013-1. Cf. p. 27.
- [74] Akira TODOROKI, Miho TANAKA et Yoshinobu SHIMAMURA. « Electrical resistance change method for monitoring delaminations of CFRP laminates : effect of spacing between electrodes ». Dans : *Composites Science and Technology* 65.1 (jan. 2005), p. 37–46. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2004.05.018. Cf. p. 27.
- [75] Masahito UEDA et al. « Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method : Application of normalization method and the effect of the shape of a delamination crack ». Dans : *Advanced Composite Materials* 13.3 (2004), p. 311–324. ISSN : 0924-3046. DOI : 10.1163/1568551042580226. Cf. p. 27.
- [76] Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Self-sensing of flexural strain and damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement ». Dans : *Carbon* 44.13 (2006), p. 2739–2751. ISSN : 0008-6223. DOI : 10.1016/j.carbon.2006.03.034. Cf. p. 27.
- [77] Shoukai WANG, D. D. L. CHUNG et Jaycee H. CHUNG. « Self-sensing of Damage in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composite Cylinder by Electrical Resistance Measurement ». Dans : *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 17.1 (2006), p. 57. ISSN : 1045-389X. DOI : 10.1177/1045389X06056072. Cf. p. 27.
- [78] S. WANG et al. « Early fatigue damage in carbon-fibre composites observed by electrical resistance measurement ». Dans : *Journal of Materials Science* 33.15 (août 1998), p. 3875–3884. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1023/A:1004672024221. Cf. p. 27.
- [79] Patricia P. PARLEVLIET, Harald E. N. BERSEE et Adriaan BEUKERS. « Residual stresses in thermoplastic composites – A study of the literature – Part II : Experimental techniques ». Dans : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 38.3 (2007), p. 651–665. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2006.07.002. Cf. p. 27.

- [80] K. SCHULTE. « Damage monitoring in polymer matrix structures ». Dans : *Journal de physique IV* 3.7 (nov. 1993), p. 1629–1636. ISSN : 1155-4339. DOI : 10.1051/jp4:19937255. Cf. p. 27.
- [81] K. SCHULTE et C. BARON. « Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements ». Dans : *Composites Science and Technology* 36.1 (1989), p. 63–76. ISSN : 0266-3538. Cf. p. 27.
- [82] Xiaojun WANG et D. D. L. CHUNG. « Real-time monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement ». Dans : *Smart Materials and Structures* 6.4 (déc. 1997), p. 504–508. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/6/4/017. Cf. p. 27.
- [83] Xiaojun WANG, Shoukai WANG et D. D. L. CHUNG. « Sensing damage in carbon fiber and its polymer-matrix and carbon-matrix composites by electrical resistance measurement ». Dans : *Journal of Materials Science* 34.11 (juin 1999), p. 2703–2713. ISSN : 0022-2461. DOI : 10.1023/A:1004629505992. Cf. p. 27, 29.
- [84] X. WANG et D. D. L. CHUNG. « Fiber breakage in polymer-matrix composite during static and dynamic loading, studied by electrical resistance measurement ». Dans : *Journal of Materials Research* 14.11 (nov. 1999), p. 4224–4229. ISSN : 0884-2914. DOI : 10.1557/JMR.1999.0572. Cf. p. 27.
- [85] Xiaojun WANG et D. D. L. CHUNG. « Sensing delamination in a carbon fiber polymer-matrix composite during fatigue by electrical resistance measure ». Dans : *Polymer Composites* 18.6 (1998), p. 692–700. ISSN : 0272-8397. DOI : 10.1016/S1359-8368(97)00014-0. Cf. p. 27, 29.
- [86] Jae Wang CHO et Jun Sik CHOI. « Relationship between electrical resistance and strain of carbon fibers upon loading ». Dans : *Journal of Applied Polymer Science* 77.9 (août 2000), p. 2082–2087. ISSN : 0021-8995. DOI : 10.1002/2F1097-4628(20000829)77%3A9%3C2082%3A%3AAID-APP26%3E3.0.CO%3B2-W. Cf. p. 27.
- [87] T. PRASSE et al. « A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 831–835. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00179-2. Cf. p. 28.
- [88] J. C. ABRY et al. « In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 855–864. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00181-0. Cf. p. 28, 30.
- [89] M. KUPKE, K. SCHULTE et R. SCHÜLER. « Non-destructive testing of FRP by DC and AC electrical methods ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (juin 2001), p. 837–847. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00180-9. Cf. p. 28, 30.
- [90] K. OMAGARI et al. « Detection of Matrix Cracking of CFRP Using Electrical Resistance Changes ». Dans : *Key Engineering Materials* 297 (2005), p. 2096–2101. ISSN : 1013-9826. Cf. p. 28.
- [91] Akira TODOROKI et al. « Matrix crack detection of CFRP using electrical resistance change with integrated surface probes ». Dans : *Composites Science and Technology* 66.11–12 (sept. 2006), p. 1539–1545. ISSN : 0266-3538. DOI : doi:10.1016/j.compscitech.2005.11.029. Cf. p. 28.
- [92] Yoshinobu SHIMAMURA et al. « Application of Electric Resistance Change Method to Damage Detection of CFRP Bolted Joints ». Dans : *Key Engineering Materials* 297 (2005), p. 653–658. ISSN : 1013-9826. Cf. p. 28.
- [93] Yoshinobu SHIMAMURA et al. « Detectability of Bearing Failure of Composite Bolted Joints by Electric Resistance Change Method ». Dans : *Key Engineering Materials* 321.2 (2006), p. 957. ISSN : 1013-9826. Cf. p. 28.
- [94] Ruediger SCHUELER, Shiv P. JOSHIA et Karl SCHULTE. « Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (mai 2001), p. 921–930. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00178-0. Cf. p. 29.

- [95] W. GEBRIAL et al. « Non-contact imaging of carbon composite structures using electric potential (displacement current) sensors ». Dans : *Measurement Science and Technology* 17.6 (2006), p. 1470–1476. ISSN : 0957-0233. DOI : 10.1088/0957-0233/17/6/026. Cf. p. 29, 30.
- [96] University of MAGDEBURG. *Eddy current inspection with EddyCation*. URL : <http://www.uni-magdeburg.de/iwfzfp/EddyCation/en/EddyCation.htm> (visité le 01/03/2009). Cf. p. 31.
- [97] Joseph M. BUCKLEY. *An introduction to Eddy Current Testing theory and technology*. Rap. tech. Herts, UK : Hocking NDT, 1994. URL : <http://www.joe.buckley.net/papers/eddyc.pdf>. Cf. p. 31.
- [98] A. R. VALLEAU. « Eddy current nondestructive testing of graphite composite materials ». Anglais. Dans : *Materials Evaluation* 48.2 (fév. 1990), p. 230–239. ISSN : 0025-5327. Cf. p. 31.
- [99] A. Reed VALLEAU et Thomas A. O. GROSS. « Methods for nondestructive eddy-current testing of structural members with automatic characterization of faults ». Anglais. Brev. américain 5028100. TRUSTEES, OF THE THOMAS GROSS 1988 REVOCABLE TRUST A. D. 2 juil. 1991. Cf. p. 31.
- [100] D. PLACKO et I. DUFOUR. « Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite-composite materials ». Dans : *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Houston, TX, USA 1992, p. 1676–1682. ISBN : 0-7803-0635-X. DOI : 10.1109/IAS.1992.244235. Cf. p. 31.
- [101] C. W. DAVIS et al. *Combined Investigation of Eddy Current and Ultrasonic Techniques for Composite Materials NDE*. Rap. tech. 95N26778. Langley, VA, USA : National Aeronautics et Space Administration, Langley Research Center, 1993. Cf. p. 31.
- [102] Gerhard MOOK, Rolf LANGE et Ole KOESER. « Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents ». Dans : *Composites Science and Technology* 61.6 (2001), p. 865–873. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(00)00164-0. Cf. p. 31.
- [103] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *SQUID*. 2008. URL : <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SQUID> (visité le 26/02/2008). Cf. p. 31.
- [104] A. RUOSI et al. « Analysis of low-velocity impact damage in reinforced carbon fibercomposites by HTS-SQUID magnetometers ». Dans : *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 11.2 (mar. 2001), p. 1172–1175. ISSN : 1051-8223. DOI : 10.1109/77.919557. Cf. p. 31.
- [105] Yoshimi HATSUKADE et al. « Non-contact SQUID-NDT method using a ferrite core for carbon-fibre composites ». Dans : *Superconductor Science and Technology* 15.12 (nov. 2002), p. 1728–1732. ISSN : 0953-2048. DOI : 10.1088/0953-2048/15/12/320. Cf. p. 31.
- [106] A. RUOSI et al. « Magnetic response of damaged carbon fibre reinforced plastics measured by a HTS-SQUID magnetometer ». Dans : *Composite structures* 56.2 (2002), p. 141–149. ISSN : 0263-8223. DOI : 10.1016/S0263-8223(01)00167-2. Cf. p. 31.
- [107] Chris CARR et al. « HTS SQUIDS for the nondestructive evaluation of composite structures ». Dans : *Superconductor Science and Technology* 16.12 (2003), p. 1387–1390. ISSN : 0953-2048. DOI : 10.1088/0953-2048/16/12/014. Cf. p. 31.
- [108] C. CARR et al. « SQUID-based nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer ». Dans : *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13 (2 2003), p. 196–199. ISSN : 1051-8223. DOI : 10.1109/TASC.2003.813682. Cf. p. 31.
- [109] C. BONAVALONTÀ et al. « Detection of early stage damage in carbon fiber reinforced polymers for aeronautical applications using an HTS SQUID magnetometer ». Dans : *The European Physical Journal B – Condensed Matter and Complex Systems* 42.4 (2004), p. 491–496. ISSN : 1434-6028. DOI : 10.1140/epjb/e2005-00007-9. Cf. p. 31.

- [110] D. GRAHAM et al. « Impact damage detection in carbon fibre composites using HTS SQUIDS and neural networks ». Dans : *NDT & E International* 37.7 (2004), p. 565–570. ISSN : 0963-8695. DOI : 10.1016/j.ndteint.2004.03.001. Cf. p. 31.
- [111] A. RUOSI. « Nondestructive detection of damage in carbon fibre composites by SQUID magnetometry ». Dans : *Physica status solidi (c)* 2.5 (2005), p. 1533–1555. ISSN : 1610-1634. DOI : 10.1002/pssc.200460835. Cf. p. 31.
- [112] Michel B. LEMISTRE, Dominique PLACKO et Nicolas LIEBEAUX. « Simulation of an electromagnetic health monitoring concept for composite materials : comparison with experimental data ». Anglais. Dans : *Smart Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Structural and Biological Systems II*. Éd. par Tribikram KUNDU. T. 5047. San Diego, CA, USA : SPIE, 2003, p. 130–139. ISBN : 0-8194-4852-4. DOI : 10.1117/12.483809. Cf. p. 31.
- [113] Michel B. LEMISTRE et Daniel L. BALAGEAS. « Electromagnetic structural health monitoring for composite materials ». Anglais. Dans : *3rd International Workshop on Structural Health Monitoring : The demands and challenges*. Éd. par Fu-Kuo CHANG. Stanford, CA : CRC Press, 2001, p. 1281–1298. ISBN : optional. Cf. p. 31.
- [114] Michel B. LEMISTRE et Dominique PLACKO. « Evaluation of the performance of an electromagnetic SHM system for composite, comparison between numerical simulation, experimental data, and ultrasonic investigation ». Dans : *Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III*. Éd. par Tribikram KUNDU. T. 5394. 1. San Diego, CA, USA : SPIE, 2004, p. 148–156. DOI : 10.1117/12.539524. Cf. p. 31.
- [115] Michel Bernard LEMISTRE et Dominique Marc PLACKO. « Dispositif et procédé de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel, et structure adaptée pour un contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel de ladite structure ». langfrançais. Brev. français 2868539. CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE – ONERA. 7 oct. 2005. Cf. p. 31, 42.
- [116] Michel Bernard LEMISTRE et Dominique Marc PLACKO. « Device and method for controlling the health of a structural element area and a structure adapted for controlling health of a structural element area of said structure ». Anglais. Brev. européen 1745281. CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE – ONERA. Priorité : [115]. 24 jan. 2007. Cf. p. 31.
- [117] Michel Bernard LEMISTRE et Dominique Marc PLACKO. « Device and method for health monitoring of an area of a structural element, and structure adapted for health monitoring of an area of a structural element of said structure ». Anglais. Demande de brev. américaine 2005228208. Priorité : [115]. 13 oct. 2005. Cf. p. 31.
- [118] X. E. GROS, K. OGI et K. TAKAHASHI. « Eddy Current, Ultrasonic C-Scan and Scanning Acoustic Microscopy Testing of Delaminated Quasi-Isotropic CFRP Materials : A Case Study ». Anglais. Dans : *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 17.5 (1998), p. 389. ISSN : 0731-6844. DOI : 10.1177/073168449801700502. Cf. p. 31.
- [119] Raymond GRIMBERG et al. « Compared NDE of damages in graphite/epoxy composites by electromagnetic methods ». Anglais. Dans : *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V*. Éd. par George Y. BAAKLINI et al. T. 4336. Newport Beach, CA, USA : SPIE, 2001, p. 65–72. ISBN : 0-8194-4022-1. DOI : 10.1117/12.435576. Cf. p. 31.
- [120] Akira TODOROKI et Masahito UEDA. « Low-cost delamination monitoring of CFRP beams using electrical resistance changes with neural networks ». Dans : *Smart Materials and Structures* 15.4 (2006), N75–N84. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/15/4/N01. Cf. p. 32.
- [121] D. Y. SONG, N. TAKEDA et A. KITANO. « Correlation between mechanical damage behavior and electrical resistance change in CFRP composites as a health monitoring sensor ». Dans : *Materials Science and Engineering : A Structural Materials : Properties, Microstructure and Processing* 456.1–2 (mai 2007), p. 286–291. ISSN : 0921-5093. DOI : 10.1016/j.msea.2006.11.130. Cf. p. 32.

- [122] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Response surface methodology*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/wiki/Response\\_surface\\_methodology](http://en.wikipedia.org/wiki/Response_surface_methodology) (visité le 31/10/2007). Cf. p. 32.
- [123] Akira TODOROKI et Hiroshi SUZUKI. « Identification of Delamination Crack of graphite/epoxy Laminates by Electric Potential Method for Health Monitoring ». Dans : *Matériaux & Techniques Hors Serie* (déc. 2001), p. 34–36. ISSN : 0032-6895. Cf. p. 32.
- [124] A. TODOROKI, M. TANAKA et Y. SHIMAMURA. « Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method ». Dans : *Composites Science and Technology* 62.9 (juil. 2002), p. 1151–1160. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(02)00053-2. Cf. p. 32.
- [125] Akira TODOROKI, Miho TANAKA et Yoshinobu SHIMAMURA. « High performance estimations of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method. » Dans : *Composites Science and Technology* 63.13 (2003), p. 1911–1920. ISSN : 0266-3538. DOI : 10.1016/S0266-3538(03)00157-X. Cf. p. 32.
- [126] Atsushi IWASAKI et Akira TODOROKI. « Statistical Evaluation of Modified Electrical Resistance Change Method for Delamination Monitoring of CFRP Plate ». Dans : *Structural Health Monitoring* 4.2 (2005), p. 119–136. ISSN : 1475-9217. DOI : 10.1177/1475921705049757. Cf. p. 32.
- [127] Yoshiyasu HIRANO et Akira TODOROKI. « Damage Identification of Woven Graphite/Epoxy Composite Beams using the Electrical Resistance Change Method ». Dans : *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18.3 (2007), p. 253. ISSN : 1045-389X. DOI : 10.1177/1045389X06065467. Cf. p. 32.
- [128] Atsushi IWASAKI et al. « An unsupervised statistical damage detection method for structural health monitoring (applied to detection of delamination of a composite beam) ». Dans : *Smart Materials and Structures* 13.5 (2004), N80–N85. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/13/5/N02. Cf. p. 32.
- [129] Samir TRABELSI et Stuart O. NELSON. « Influence of Nonequilibrated Water on Microwave Dielectric Properties of Wheat and Related Errors in Moisture Sensing ». Dans : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 56 (fév. 2007), p. 194–198. ISSN : 0018-9456. DOI : 10.1109/TIM.2006.887314. Cf. p. 33.
- [130] Guido GENTILI, Cristiano RIMINESI et Vasco TESI. « Low Cost Microwave Sensor for Moisture Content Measurement in Paper Milling Industry ». Dans : *Sensing and Imaging* 7.4 (déc. 2006), p. 155–173. ISSN : 1557-2064. DOI : 10.1007/s11220-006-0027-2. Cf. p. 33.
- [131] J. KEROUEDAN et al. « Détection de micro-fissures à la surface des métaux par des techniques micro-ondes ». Dans : *Journées nationales Micro-ondes*. 4D19. Université de Toulouse. Toulouse, France 2007. Cf. p. 33.
- [132] Reza ZOUGHI. *Microwave non-destructive testing and evaluation*. Anglais. New York 2000. ISBN : 0-412-62500-8. Cf. p. 33.
- [133] Claire DALMAY et al. « Bio-capteurs pour la caractérisation cellulaire aux fréquences radio et micro-ondes ». Dans : *Journées nationales Micro-ondes*. 5E7. Université de Toulouse. Toulouse, France 2007. Cf. p. 33.
- [134] Elise C. FEAR, Paul M. MEANEY et Maria A. STUCHLY. « Microwaves for breast cancer detection ». Dans : *IEEE potentials* 22.1 (fév. 2003), p. 12–18. ISSN : 0278-6648. DOI : 10.1109/MP.2003.1180933. Cf. p. 33.
- [135] Paul M. MEANEYA et al. « Initial clinical experience with microwave breast imaging in women with normal mammography ». Anglais. Dans : *Academic Radiology* 14.2 (fév. 2007), p. 207–218. ISSN : 1076-6332. DOI : doi:10.1016/j.acra.2006.10.016. Cf. p. 33, 34.
- [136] Masahito UEDA et Akira TODOROKI. « Asymmetrical dual charge EPCM for delamination monitoring of CFRP laminate ». Dans : *Key Engineering Materials* 321 (2006), p. 1309–1315. ISSN : 1013-9826. Cf. p. 33.



- [137] W. Van PAEPEGEM, I. De BAERE et J. DEGRIECK. « The use of rivets for electrical resistance measurement on carbon fibre-reinforced thermoplastics ». Dans : *Smart Materials and Structures* 16.5 (2007), p. 1821–1828. ISSN : 0964-1726. DOI : 10.1088/0964-1726/16/5/037. Cf. p. 33.
- [138] S. WANG, D. S. PANG et D. D. L. CHUNG. « Hygrothermal Stability of Electrical Contacts Made from Silver and Graphite Electrically Conductive Pastes ». Dans : *Journal of Electronic Materials* 36.1 (2007), p. 65–74. ISSN : 0361-5235. DOI : 10.1007/s11664-006-0018-z. Cf. p. 33.
- [139] *Journées nationales Micro-ondes*. Université de Toulouse. Toulouse, France 2007.

## Chapitre 4

# Trois nouvelles méthodes électriques

### Table des matières

4.1	Introduction . . . . .	46
4.2	Détection des défauts par une approche de type back-scattering . . . . .	46
4.2.1	Introduction . . . . .	46
4.2.2	Les mesures microondes de type espace libre . . . . .	46
4.2.2.1	Présentation de la mesure . . . . .	46
4.2.2.2	Les détails . . . . .	47
4.2.2.3	Lien entre les paramètres secondaires et l'endommagement . . . . .	48
4.2.2.4	Conclusion . . . . .	49
4.2.3	La mesure de type backscattering . . . . .	49
4.2.3.1	Le principe . . . . .	49
4.2.3.2	La modulation . . . . .	50
4.2.4	Résultats expérimentaux . . . . .	51
4.2.5	Perspectives . . . . .	53
4.2.5.1	Dans le domaine du contrôle de qualité à la fabrication . . . . .	53
4.2.5.2	Améliorations possibles . . . . .	53
4.2.6	Conclusion . . . . .	53
4.3	Détection du sens des fibres . . . . .	54
4.3.1	Problématique . . . . .	54
4.3.2	La solution technique . . . . .	54
4.3.2.1	État de l'art des méthodes planaires . . . . .	54
4.3.2.2	La méthode résonnante slot . . . . .	55
4.3.3	Simulation . . . . .	55
4.3.4	Mesure . . . . .	56
4.3.5	Conclusion et perspective . . . . .	56
4.4	Détection des impacts par une approche de mesure anisotrope . . . . .	56
4.4.1	Problématique . . . . .	56
4.4.2	Une mesure d'anisotropie . . . . .	58
4.4.3	Mesures . . . . .	60
4.4.4	Construction d'un impacteur . . . . .	60
4.4.5	Perspectives et conclusion . . . . .	63
4.5	Conclusion . . . . .	63
4.6	Bibliographie . . . . .	63

## 4.1 Introduction

Les méthodes de détection électrique, comme nous l'avons vu dans la section précédente, ont donné des résultats intéressants. De même les méthodes radiofréquences sont capables dans le cas des composites en fibres de verre de donner des résultats et de détecter certains type de défauts. Néanmoins, à notre connaissance, il n'existe pas de méthode de détection de défauts spécifiquement mis au point pour les composites carbonés.

Afin d'être susceptible d'application industrielles, ces méthodes devront être, de préférence, à bas coût et facilement utilisables. La robustesse de la mesure est fondamentale, la méthode de mesure doit pouvoir assurer des mesures correctes en ne nécessitant qu'une calibration minimale. En effet, plus que le coût du dispositif, un des plus grands postes de dépense dans le domaine du contrôle non destructif est le coût de la main d'œuvre, en particulier le coût et la durée des formations qui représentent un important investissement financier. Ces formations sont obligatoires et récurrentes (tous les ans en aviation), et bien entendus leurs durées est proportionnelle à la difficulté d'utilisation de l'appareil. Afin d'éviter d'augmenter ces coûts cachés, la méthode de mesure doit pouvoir assurer des mesures correctes en ne nécessitant pas une calibration soignée.

Dans ce chapitre nous exposerons donc notre travail concernant trois nouvelles méthodes de détection électriques des défauts dans les composites carbonés.

## 4.2 Détection des défauts par une approche de type back-scattering

### 4.2.1 Introduction

Un des problèmes critiques rencontrés couramment sur les composites carbonés est la détection des impacts. Comme explicitée dans le chapitre précédent, ces impacts peuvent abimer de manière profonde le composite.

Le but de cette méthode est d'évaluer les impacts dans les composites carbonés, en particulier les impacts que l'avion subit lors de ses réparations ou de sa fabrication. Malgré le grand professionnalisme des équipes de maintenance ou d'assemblage, il arrive souvent que les panneaux soient impactés lors de la fabrication ou de la réparation. A l'heure actuelle pour les panneaux en aluminium des techniques à base de moirée ont été développées [1, 2] qui permettent de détecter ce genre de défauts. Malheureusement ce type de méthode n'est pas applicable aux matériaux composites. En effet l'état de surface rugueux des matériaux composites ne permet pas de détecter un enfoncement dû à un impact, contrairement aux matériaux métalliques parfaitement lisses.

L'idée de la mesure est de détecter un changement de conductivité électrique due à une rupture des fibres ou à une délamination. Cette nouvelle méthode est dérivée d'une méthode de mesure en espace libre.

### 4.2.2 Les mesures microondes de type espace libre

#### 4.2.2.1 Présentation de la mesure

La mesure dite en espace libre est une mesure de type transmission-réflexion faite en mettant l'échantillon à mesurer entre deux antennes (voir figure 4.1). Une onde électromagnétique se propage entre les deux antennes, et interagit avec les matériaux en présence. Cette onde émise donne naissance à une onde réfléchie et une onde transmise. L'intensité et le déphasage de l'onde transmise et réfléchie par rapport à l'onde émise renseigne sur le matériau en cours de test.

Ces ondes ne peuvent être directement mesurées mais elle créent au niveau des antennes de mesures une onde de tension incidente  $V^+$  et une tension réfléchie  $V^-$  qui peut être directement mesurée à l'aide d'un analyseur de réseaux. Ainsi la mesure du matériaux sous test consiste à mesurer les paramètres  $S$  du système à deux antennes soit :

$$\begin{pmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

#### 4.2. DÉTECTION DES DÉFAUTS PAR UNE APPROCHE DE TYPE BACK-SCATTERING 47

Avec les notations de la figure 4.1. Pour des raisons de symétrie évidente  $S_{11} = S_{22}$  et  $S_{12} = S_{21}$ . La mesure est effectuée à l'aide d'un analyseur de réseau mesurant directement les paramètres  $S$ .

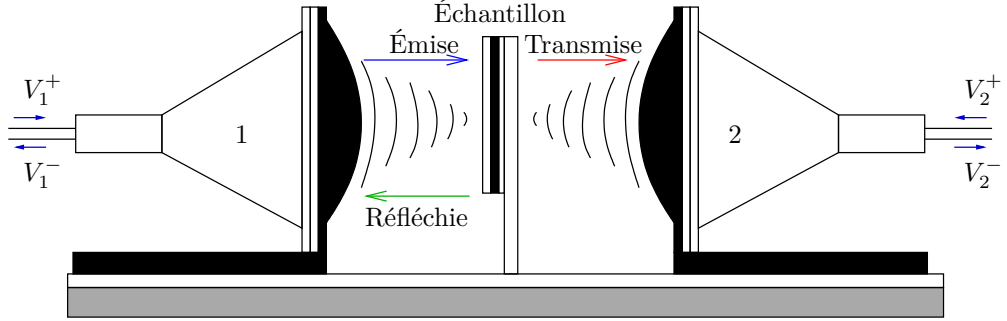


FIG. 4.1: Principe de la mesure en espace libre [3].

Contrairement à la mesure en guide d'onde, ce type de mesure possède plusieurs avantages. En premier lieu, pour des matériaux comme les nôtres c'est-à-dire inhomogènes, elle permet des mesures plus précises qu'en guide. En effet les inhomogénéités existantes (par exemple un état de surface irrégulier) lors d'une mesure en guide d'onde exciteront des modes d'ordre supérieur alors que ce problème n'existe pas pour des mesures en espace libre, renforçant ainsi la précision de la mesure. L'avantage le plus important de cette méthode est qu'elle peut être mise en œuvre sans contact et sans préparation d'échantillon spécifique, permettant ainsi une plus grande aisance de mesure.

##### 4.2.2.2 Les détails

Les paramètres  $S$  sont physiquement liés aux paramètres électriques ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) de l'échantillon. Nous rappelons dans cette section les calculs permettant de calculer les paramètres  $S$  à partir de ( $\epsilon_r, \mu_r$ ). Il peut être démontré, en appliquant les relations usuelles au niveau de l'interface air-échantillon que les paramètres  $S$  peuvent être reliés à des caractéristiques secondaires du matériau  $\Gamma$  et  $T$  [3, 4] :

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad S_{12} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (4.2)$$

Où  $\Gamma$  est le coefficient de réflexion à l'interface air-échantillon et  $T$  le coefficient de transmission au travers de l'interface :

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \quad T = e^{-\gamma d} \quad (4.3)$$

Les paramètres  $\gamma$  et  $z$  sont liés aux constantes du matériaux ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) et à la largeur de l'échantillon  $d$  par :

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \gamma_0 = \frac{2j\pi}{\lambda_0} \quad z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (4.4)$$

avec  $\lambda_0$  la longueur d'onde dans le vide et  $j^2 = -1$ .

Il peut être déduit à partir de (4.2) que :

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (4.5)$$

Le signe  $\pm$  est choisi de telle sorte que  $|\Gamma| < 1$  (critère de passivité). On peut en déduire que :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{1}{T}}{d} \quad z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4.6)$$

Soit :

$$\varepsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \quad \mu_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4.7)$$

Une subtilité doit être notée  $T$  est un nombre complexe et donc  $\ln \lambda$  n'est pas défini de manière unique. Si  $T$  est défini par :

$$T = |T| e^{j\varphi} \quad (4.8)$$

Alors  $\gamma$  est donné par :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{1}{|T|}}{d} + j \frac{2\pi n - \varphi}{d} \quad (4.9)$$

La partie réelle de  $\gamma$  est unique mais la partie imaginaire est ambiguë. Cette ambiguïté peut être levée en notant que la constante de phase  $\beta$  est :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_m} \triangleq \Im \gamma \quad (4.10)$$

Avec  $\lambda_m$  la longueur d'onde dans le matériel. Soit encore :

$$\frac{d}{\lambda_m} = n - \frac{\varphi}{2\pi} \quad (4.11)$$

Le cas où  $d < \lambda_m$  est alors trivial c'est-à-dire  $n = 0$  (ce qui correspond à notre cas d'étude la plaque de carbone étant d'épaisseur faible devant la longueur d'onde). Pour les autres cas il suffira soit de faire des mesures avec plusieurs fréquences soit de changer la fréquence de mesure.

Dans le cas d'un matériau non magnétique [5], soit  $\mu_r = 1 + j0$  (c'est à dire le cas du carbone), le système est alors totalement découplé, et il est possible d'utiliser seulement la mesure en transmission afin de déterminer la constante diélectrique du matériaux :

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (4.12)$$

En effet  $z$  et  $\gamma$  se simplifient alors :

$$z = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \gamma = \gamma_0 \sqrt{\varepsilon_r} \quad (4.13)$$

#### 4.2.2.3 Lien entre les paramètres secondaires et l'endommagement

Il est bien connu que le carbone et les composites carbone sont des matériaux non magnétiques. Le seul paramètre pouvant jouer est alors le paramètre diélectrique complexe, en particulier au travers de la conductivité. Comme vu dans le chapitre précédent, la conductivité d'un composite carbone est corrélée de manière forte à son endommagement. La constante diélectrique du matériaux sera donc :

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r(1 + \delta) \quad (4.14)$$

Avec  $\varepsilon'_r$ ,  $\varepsilon''_r$  la partie réelle et imaginaire de la constante diélectrique du matériau non endommagée et  $\delta$  la variation due à l'endommagement. Qualitativement l'endommagement diminuant la conductivité l'onde sera moins atténuée à la traversée du matériau. Malheureusement, ne permet pas malheureusement de donner de formules analytiques<sup>①</sup>.

En outre le modèle précédent est un modèle extrêmement simplifié de la réalité qui ne tient compte ni des inhomogénéités du matériaux ni des variations de dimensions dues à la fabrication. Bien qu'utile au point de vue de la compréhension du phénomène physique, il ne permet pas de relier l'état du matériau réel à la mesure.

Néanmoins ces deux limitations ne sont pas gênantes. En effet, dans le domaine du contrôle non destructif, le problème inverse est peu souvent résolu de manière exacte, seul compte la variation

<sup>①</sup>Réinjecter cette variation  $\varepsilon_r$  dans l'équation (4.12) et linéariser les relations autour de l'état sain ne donnent pas un résultat immédiat. Les expressions que j'ai obtenu après factorisation tiennent difficilement sur une feuille A4.

des paramètres par rapport à un échantillon témoin sain. A titre d'exemple, une radiographie des os n'évalue directement pas la solidité de l'os. Le radiologue pose un diagnostic uniquement à l'aide d'un constat basé sur une variable corrélée à la solidité de l'os, le contraste radiographique<sup>①</sup>. Dans notre cas,  $S_{21}$  est l'équivalent microonde du contraste radiographique.

#### 4.2.2.4 Conclusion

Ce type de mesure bien que relativement sensible souffre de plusieurs inconvénients :

- Elle nécessite la présence de deux antennes.
- Elle nécessite d'employer un analyseur de réseau, appareil coûteux et fragile, afin de mesurer  $S_{21}$ .

Dans les deux cas la mesure est lourde à mettre en œuvre et ne correspond pas à une approche industrielle de type contrôle non destructif. Néanmoins le principe de la mesure est intéressant car elle est sans contact et permet de détecter des défauts mécaniques.

### 4.2.3 La mesure de type backscattering

#### 4.2.3.1 Le principe

L'idée de la mesure en espace libre est séduisante si nous pouvons nous affranchir des problèmes de calibration et de l'utilisation d'un analyseur de réseau. En revenant alors au principe de la mesure en espace libre, il convient alors de remarquer que ce type de mesure est tout simplement un cas particulier de la mesure de diagramme de rayonnement d'antennes. En effet, on mesure la puissance reçue par une antenne de réception en présence d'un matériau perturbateur.

Il convient alors pour résoudre le problème des deux antennes de s'intéresser aux méthodes permettant de mesurer les caractéristiques d'une antenne en n'utilisant que l'antenne à tester, autrement dit les méthodes permettant d'utiliser l'antenne sous test en émission et réception.

Ce type de méthode, appelée méthode de type backscattering, fut utilisée à l'origine pour évaluer la surface équivalente radar [6]. Ce type de mesure est basée sur la mesure de la réflexion de l'onde incidente sur un élément réflecteur connu. La mesure nécessite alors uniquement une seule antenne et de séparer la voie émettrice de la voie réceptrice à l'aide d'un circulateur (voir figure 4.2).

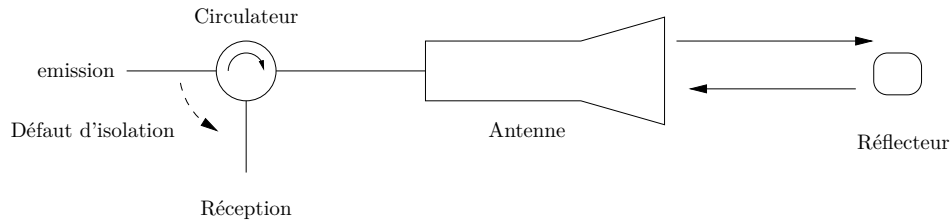


FIG. 4.2: Schéma de principe d'une de mesure par backscattering.

Cette mesure est très bonne en champs proche, en effet l'élément réflecteur peut être rendu suffisamment petit pour ne pas perturber de manière trop importante les lignes de champs. Ce type de méthode est par exemple utilisé pour déterminer les champs dans les ouvertures rayonnantes.

Néanmoins cette méthode souffre d'une faible sensibilité et d'un certain taux d'erreur. En effet, le dispositif de séparation (circulateur) de la voie émettrice et réceptrice n'est pas idéal, et une partie du signal émis se retrouve à cause des pertes d'isolation dans la voie de réception. Il se peut même que le signal venant directement de la voie d'émission soit plus important que celui venant de la voie de réception.

<sup>①</sup>Dans notre cas, l'effet correspond réellement au contraste photographique, en effet l'indice optique  $n$  est lié à la constante diélectrique par  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ .

### 4.2.3.2 La modulation

Une façon est de contourner ce problème est de moduler le signal réfléchi. En effet dans ce cas là le signal réfléchi est en dehors du spectre du signal émis. Plusieurs techniques afin de moduler sont disponibles :

- Une modulation mécanique du l'élément réfléchissant [7, 8].
- Une modulation électronique d'un élément actif par une fréquence audio [9] ou une modulation d'un élément optoélectronique [10].

**L'élément vibrant** La méthode basée sur un élément vibrant est assez facile à étudier. L'onde de retour  $s(t)$  sera tout simplement déphasée par rapport à l'onde émise par un facteur proportionnel à la distance géométrique  $\ell$  modulée par la vibration mécanique  $A_m \sin(\omega_m t)$ , avec  $A_m$  l'amplitude de vibration,  $\omega_m$  la pulsation de la vibration et  $t$  le temps. Soit :

$$s(t) = Ae^{j\omega t + 2j\beta(\ell + A_m \sin(\omega_m t))} \quad (4.15)$$

avec  $A$  l'amplitude du signal,  $\beta$  la constante de propagation électromagnétique,  $\omega = 2\pi f$  est la pulsation électromagnétique, et  $j^2 = -1$ . On utilise alors la formule bien connue de Jacobi-Anger [11] :

$$s(t) = Ae^{j\omega t + 2j\beta\ell} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} J_k(2\beta A_m) e^{jk\omega_m t} \quad (4.16)$$

Dans le cas vibratoire,  $\beta A_m \ll 1$  la somme peut donc être approximée par ses premiers termes :

$$s(t) \approx Ae^{j\omega t + 2j\beta\ell} [J_0(2\beta A_m) + J_1(2\beta A_m)(e^{j\omega_m t} - e^{-j\omega_m t})] \quad (4.17)$$

Il vient donc que l'efficacité de modulation est dans le cas d'une faible modulation de l'ordre de  $J_1(2\beta A_m)/J_0(2\beta A_m) \simeq \beta A_m$ . Cette efficacité est assez faible, par exemple, pour des vibrations de l'ordre de  $\lambda/100$ , l'application numérique donne  $-28$  dB.

**La rotation** La deuxième méthode consiste à faire tourner l'élément réfléchissant. Cette méthode est basé sur le fait que le coefficient de réflexion de l'élément réfléchissant dépend de son orientation. Le signal reçu est alors, en supposant que la dépendance angulaire de la réflectivité de l'élément réfléchissant soit en  $\sigma(\theta)$  :

$$s(t) = \sigma(\Omega_m t) Ae^{j\omega t + 2j\beta\ell} \quad (4.18)$$

où  $\Omega_m$  est la vitesse de rotation. Le spectre de la modulation est donné par la transformée de Fourier de  $\sigma$ . On en déduit donc que l'efficacité maximale est atteinte lorsque  $\sigma(\theta)$  est une combinaison linéaire de sinus et de cosinus.

**Modulation électronique** On peut aussi utiliser un élément actif (amplificateur) comme réflecteur. La modulation consiste alors à tout simplement activer/déactiver cette amplificateur de manière régulière. HARRINGTON dans [12] a prouvé que la réflectivité  $\sigma$  à l'état actif est alors :

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} \left[ \frac{GR_{in}}{Z_{in} + Z_L} \right]^2 \quad (4.19)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  l'impédance d'entrée de l'élément réfléchissant utilisé comme antenne,  $G$  le gain de cette antenne,  $Z_L$  l'impédance de la charge connectée aux bornes de l'élément réfléchissant. En utilisant un élément à résistance négative comme une diode tunnel, le dénominateur de (4.19) peut être rendu aussi petit que souhaité et ainsi l'élément réfléchissant pourra renvoyer un très large écho. L'efficacité tend alors vers l'infini. Cet élément actif peut être un dispositif optique permettant ainsi de ne pas perturber le champ local par les lignes de polarisation. Un autre avantage indéniable de l'approche active est la forte miniaturisation possible du dispositif réflectif : la pertes d'efficacité dues à la petitesse de l'antenne peut être facilement compensé par la résistance négative de l'élément actif.

**Avantage de la modulation dans notre cas d'étude** Moduler le réflecteur permet aussi de bien s'assurer dans notre cas de matériaux à tester que le signal mesuré est bien proportionnel à la transmission de l'onde au travers du matériau. En effet sans modulation il n'est pas possible de différencier le signal réfléchi par l'interface du matériaux (flèche rouge) sous test (MUT) du signal transmis (flèches bleues) et réfléchi (flèches vertes) par l'élément réfléchissant (voir figure 4.3).

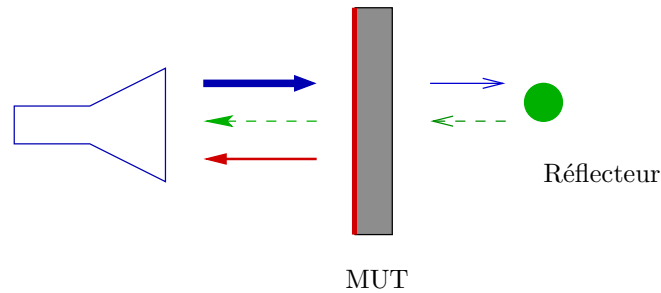


FIG. 4.3: Schéma de principe d'une de mesure de matériaux par backscattering. Les flèches représentent les diverses réflexion transmission. Les couleurs correspondent aux élément donnant naissance à l'onde transmise ou réfléchie.

#### 4.2.4 Résultats expérimentaux

Le résultat de la mesure est donnée par la figure 4.6. Le réflecteur est un réflecteur actif (mais dissipatif) de type diode varactor. La réception et l'émission sont faites à l'aide d'un montage électrique à très bas coût, un autooscillateur mélangeur. A titre d'illustration, deux photographies du dispositif expérimental sont données par les figures 4.4 et 4.5.

Même sans traitement du signal, il est possible de discriminer les dommages sur une plaque de carbone aéronautique. La mesure est simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas un appareillage métrologique lourd.

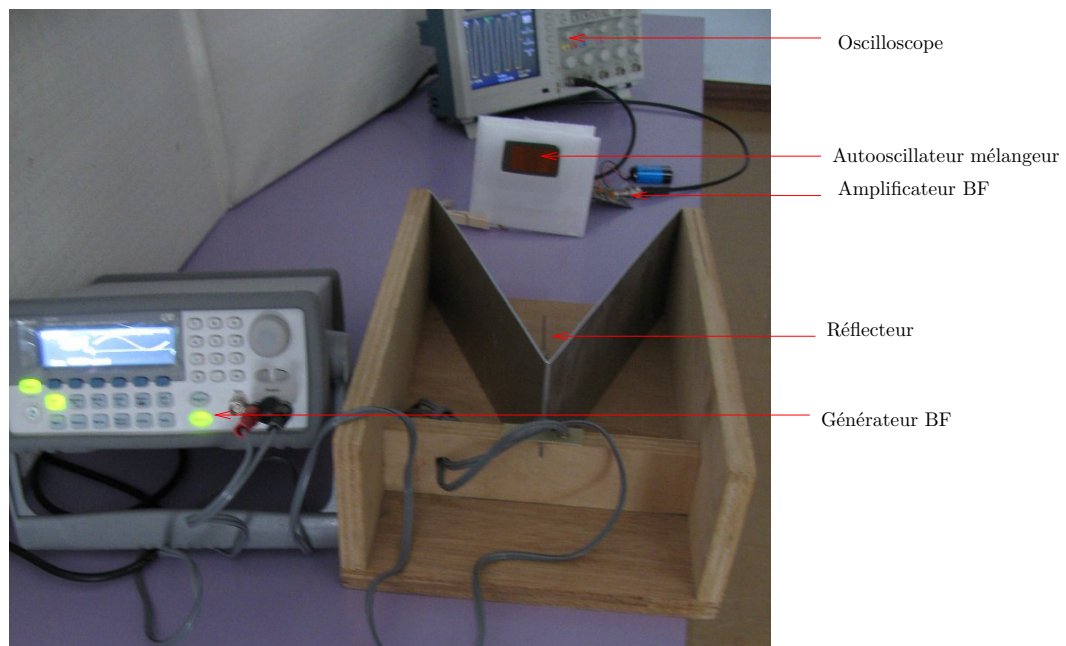


FIG. 4.4: Le dispositif de mesure sans la plaque de carbone.





FIG. 4.5: Le dispositif de mesure incluant une plaque de carbone à mesurer.

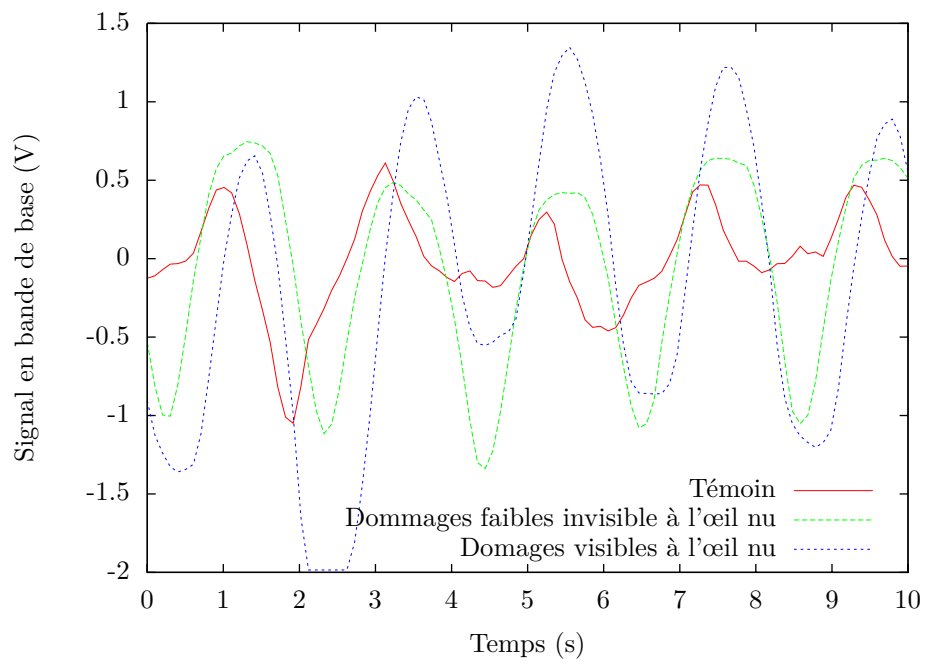


FIG. 4.6: Résultats de la mesure pour trois échantillons différents de carbone. Sans traitement du signal.

### 4.2.5 Perspectives

#### 4.2.5.1 Dans le domaine du contrôle de qualité à la fabrication

Lors de la fabrication de la pièce composite, des défauts peuvent survenir comme par exemple des sur-épaisseurs de résine, des microbulles, ou encore une mauvaise dispersion des fibres. À l'heure actuelle, ce type de défauts est difficilement détectable, et le seul contrôle qualité en sortie d'usine n'est bien souvent qu'un contrôle visuel, car une inspections ultrasonore systématique serait longue et économiquement non viable. En effet, un contrôle ultrasonore de ce type de pièce ne peut être que manuel, car nécessitant un contact mécanique. Seules quelques pièces sont soumises à un contrôle exhaustif. En cas de problème sur une pièce prise au hasard le lot entier est alors minutieusement inspecté.

La méthode décrite dans cette section pourrait être appliquée au contrôle non destructif en bout de chaîne de fabrication. Une antenne fixe enverrait une onde qui traverserait la pièce à évaluer, et serait réfléchiée par un réflecteur mobile. Dans le cas d'une pièce plane, le réflecteur pourrait être tout simplement asservi comme sur une table traçante. Un schéma de principe de ce dispositif est donné par la figure 4.7. La méthode étant sans contact, le coût peut être alors fortement diminué par l'automatisation.

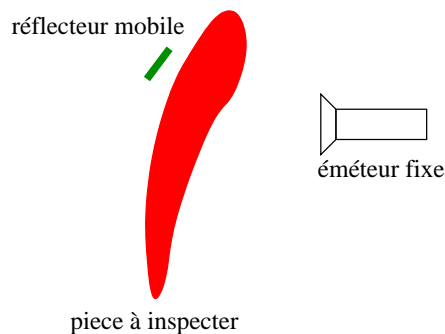


FIG. 4.7: Schéma de principe d'un dispositif de contrôle qualité à l'aide de la méthode de backscattering

#### 4.2.5.2 Améliorations possibles

Il est possible d'améliorer fortement le réflecteur. En particulier, en lieu et place du réflecteur à diodes PIN nous pouvons utiliser un composant actif de type diode tunnel et ainsi améliorer grandement l'efficacité réfléchive.

De même, il est possible de gagner quelques décibels de manière entièrement passive en utilisant des antennes à directivité plus élevées, comme par exemple l'antenne spirale de [13] ou l'antenne méandre de [14]. Ces deux antennes possèdent une taille très petite (de l'ordre de  $\lambda/80$ ) ce qui permet d'obtenir une bonne résolution spatiale tout en ayant un assez bon gain.

Il est aussi possible, en rajoutant une diode varactor, de régler la fréquence de résonance du résonateur, et ainsi rajouter une information supplémentaire au sujet du matériau sous test.

### 4.2.6 Conclusion

Une méthode originale de détection de dommage a été mise au point. Cette méthode permet de détecter facilement des dommages de type impacts, pour un coût dérisoire. Cette méthode a fait l'objet d'une communication dans une conférence internationale avec actes [15]. À notre connaissance c'est la première communication concernant la méthode de backscattering utilisée dans le domaine du contrôle non destructif.

L'utilisation de la méthode de type backscattering permet ainsi une localisation précise des défauts sur la structure à inspecter pour un très faible coût. Un développement industriel dans le cadre d'un contrôle non destructif en bout de chaîne de fabrication semble possible.

## 4.3 Détection du sens des fibres

### 4.3.1 Problématique

Lors d'opérations de maintenance sur des composites carbonés, il est important de connaître le sens des fibres, et ce même dessous une couche de peinture. En effet certaines opérations de ponçage ou de découpage nécessitent cette information afin d'éviter de déchirer le composite lors des divers travaux.

Les contraintes s'appliquant au dispositif précédent s'appliquent indifféremment à ce nouveau dispositif. Il convient donc qu'il soit sans contact et ne nécessitant pas une calibration évoluée. Il est aussi souhaitable qu'il puisse être utilisé malgré la présence d'une couche de peinture, recouvrant le carbone.

Les matériaux à base de fibres de carbonés sont des matériaux anisotropes. Cette anisotropie se retrouve bien évidemment au point de vue électrique. L'idée de base est donc de mesurer cette anisotropie électrique.

Ce type de mesure est utilisé avec succès depuis de nombreuses années dans le domaine du bois entre autre. Grâce à ce type d'approche anisotrope, il est possible de détecter particulièrement les noeuds dans les grands troncs et ainsi optimiser la phase de sciage ou de sélection des bois [16–18], optimisant ainsi l'utilisation du bois et diminuant les déchets.

### 4.3.2 La solution technique

#### 4.3.2.1 État de l'art des méthodes planaires

La technique utilisée est donc une mesure d'anisotropie. L'approche usuelle de mesure d'anisotropie électrique par une mesure en guide d'onde circulaire [5] n'est pas applicable car elle est bien entendue destructive.

Une des solutions possible consiste donc à utiliser une approche basée sur une mesure de type perturbatrice de circuits planaires. Cette approche consiste à perturber un circuit planaire par le matériau sous test. Cette approche permet par exemple à l'aide d'un simple circuit microruban de mesurer les caractéristiques d'une plaque de circuit imprimée.

Ce type de mesure utilisée très souvent dans le cas isotrope, est plus rare dans le cas anisotrope [19–21] et est bien souvent appliquée à la mesure de matériaux ferromagnétique, et ce, bien que les effets de l'anisotropie dans les circuits planaires soient connus depuis longtemps [22].

Plusieurs techniques en dehors de la nature géométrique de la ligne sont alors disponibles. Nous citerons donc principalement :

- Les approches non résonnantes qui consistent à mesurer les paramètres de transmission et de réflexion de la ligne sur une bande de fréquences et à les comparer à la théorie.
- Les approches résonnantes qui consistent à mesurer la fréquence de la ligne à la résonance.

À notre avis, il convient de privilégier une approche de type résonnante car :

- À la résonance les champs sont généralement importants et ont tendance à rayonner, à sortir de la structure ligne substrat. Cela permet donc de mieux coupler l'énergie avec le matériau sous test et donc d'améliorer la qualité de la mesure. Une mesure en transmission aurait été plus judicieuse dans le cas où nous souhaiterions mesurer le substrat du circuit imprimé.
- La fréquence de résonance est une grandeur facile à mesurer.

Une fois le type de mesure choisi, il convient de sélectionner la géométrie de la ligne.

La géométrie de type stripline peut être directement éliminée. En effet, la présence de deux plans de masse la rend difficilement non destructive (voir la figure 4.8 pour un exemple de mesure par une stripline) surtout pour des pièces de grande largeur.

Le choix de la topologie de la ligne de mesure est plus délicat, mais au regard de [24] il convient de privilégier un capteur de type slot. En effet ce type de capteur possède une sensibilité à l'anisotropie plus grande que les classiques capteurs de type microruban.

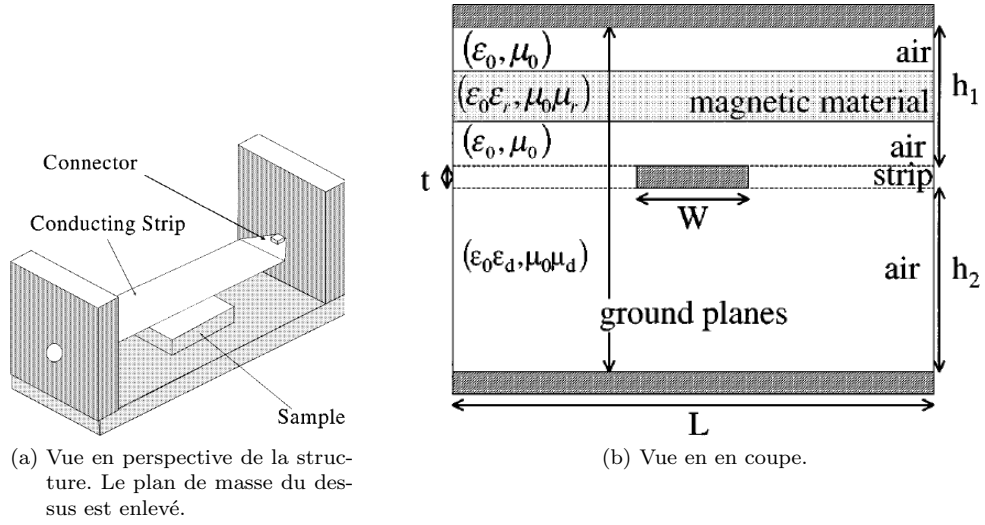


FIG. 4.8: Mesure de type stripline [23]

#### 4.3.2.2 La méthode résonnante slot

Les capteurs slots [25, 26], bien que moins utilisés que les capteurs microstrip, ont donné lieu à une littérature assez abondante [27]. Ces capteurs sont composés d'un plan de masse en cuivre comprenant une fente non métallisée se comportant comme un résonateur de type  $\lambda/2$ . Dans le cas isotrope ils ont été utilisés par exemple pour mesurer les degrés d'humidité du papier en fin de fabrication [28] ou encore la mesure du taux d'humidité dans le sol [29].

Qualitativement on peut considérer que le champ électrique peut être approximé pour les slots de type fentes fines et en champ proche par une quasi statique développée par COHN dans [30, eq. (10), (11)]. Dans ce cas le champ électrique est alors uniquement suivant les direction  $(Oy)$  ou  $(Oz)$ . Ainsi majoritairement, on mesurera la composante suivant  $y$  du tenseur diélectrique (voir la figure 4.9 pour un schéma de principe). En outre la ligne slot confine mal le champ dans le substrat, ce qui dans notre cas améliore la mesure en augmentant l'énergie injectée dans le matériaux mesuré et donc la sensibilité (voir [31] pour les schémas des lignes de champ). Globalement ce type de capteur est assez sensible et assure une variation de la fréquence de résonance d'une dizaine de pourcents pour un  $\epsilon_r$  variant de 1 à 15 [32].

La réalisation pratique de ce genre de capteur est simplifiée par l'existence de formule de synthèse dans le cas isotrope [33, 34] donnant en fonction des paramètres géométriques, les paramètres électriques. Il convient de noter, que les lignes *slot* sont peu sensibles aux tolérances de fabrication [35], ce qui assure donc une bonne reproductibilité de la mesure.

#### 4.3.3 Simulation

Bien que quelques méthodes ad-hoc existent afin de déterminer les paramètres électriques de la ligne slot sur des substrat anisotropes [36–39] ces méthodes sont assez fastidieuses à programmer. Nous avons donc effectué une simulation du circuit sous le logiciel HFSS.

Le capteur de type slot a été conçu pour résonner dans l'espace libre au alentours de 2.45 GHz à l'aide des formules de synthèse et d'une optimisation manuelle. Ce capteur a été ensuite mis en présence d'une couche de 0.5 mm de matériau à base de fibres de carbone dont la conductivité a été prise égale à 33000 S/m dans le sens des fibres et de 1000 S/m dans les autres directions (conformément aux valeurs de la littérature).

Afin d'améliorer la sensibilité de la mesure et d'éviter de court-circuiter le slot par le matériaux à pertes, le capteur a été surélevé par un système de cale isolante incluant une lame d'air de 8 mm par rapport à la plaque de carbone.

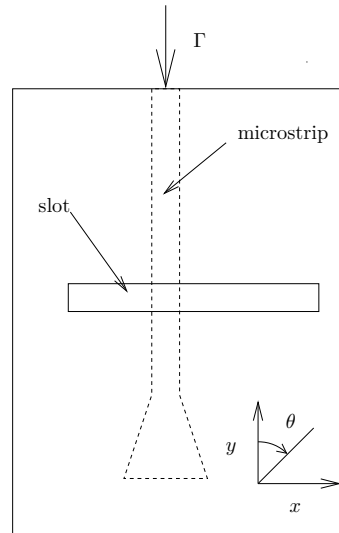


FIG. 4.9: Schéma de principe d'un capteur slot

Les résultats de la simulation sont donnés par la figure 4.10 dans le cas d'un carbone monocouche et dans la figure 4.12.

#### 4.3.4 Mesure

Une mesure fut effectuée sur un composite carbone unidirectionnel. Les résultats obtenus permettent de déduire le sens des fibres carbonées. Le capteur a été retouché manuellement comparé à la simulation afin d'avoir une sensibilité maximale, ce qui explique l'écart entre les mesures et la simulation. La variabilité des composites carbonés étant très importante et le coût d'un capteur étant faible (de l'ordre de la dizaine d'euros), il est probable que la solution industrielle soit composée de plusieurs capteurs s'adaptant aux différents types de matériaux carbone.

#### 4.3.5 Conclusion et perspective

La détection du sens des fibres a été réalisée par un capteur bas coût. Il conviendra dans le futur de déduire à partir des paramètres géométriques du circuit un modèle équivalent, simplifiant ainsi l'analyse des résultats [32, 40].

En outre, il conviendra de compléter cette étude sur un grand nombre de composites carbonés afin de vérifier que la méthode donne des résultats satisfaisants quel que soit le type de matériaux.

Cette méthode a donnée lieu à une communication orale dans une conférence avec actes [41].

### 4.4 Détection des impacts par une approche de mesure anisotrope

#### 4.4.1 Problématique

La méthode présentée dans la section 4.2 bien qu'efficace et pouvant détecter les défauts dans les composites carbonés souffrent de deux imperfections :

- Elle nécessite la présence d'un réflecteur.
- Elle est sensible à la dispersion des caractéristiques électrique du composite.

En effet, la présence d'un réflecteur rend délicate la mesure in situ c'est-à-dire sur l'avion. Bien que le réflecteur puisse être rendu aussi petit que souhaité, le passage par les trous d'inspection et le guidage du réflecteur au plus près des lieux d'impact rend la mesure coûteuse en terme de main d'oeuvre. La méthode présentée dans le paragraphe 4.2 sera donc réservée à la grande

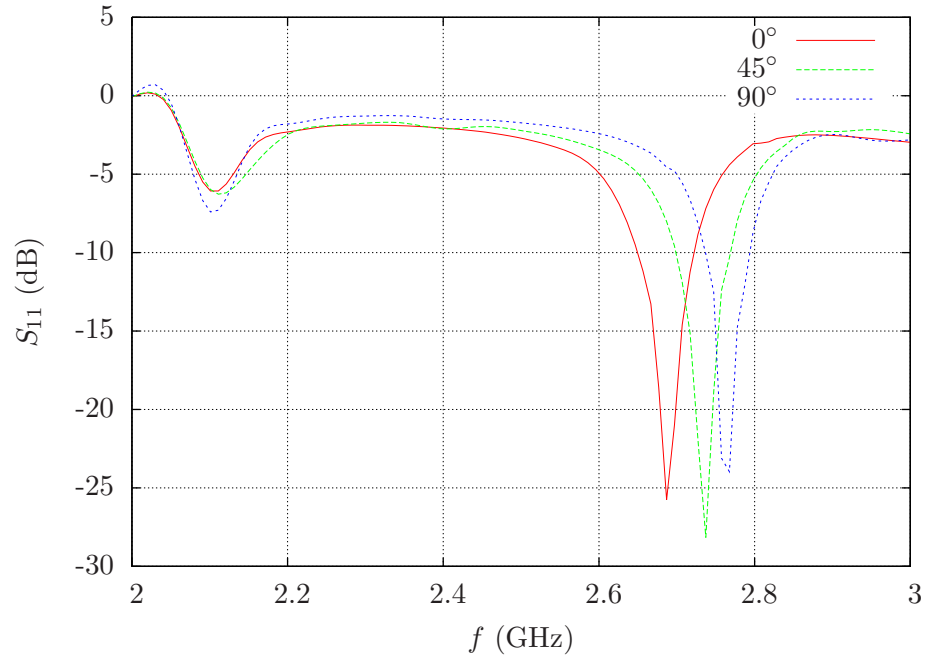


FIG. 4.10: Simulation du capteur sous HFSS. Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'orientation des fibres du carbone.

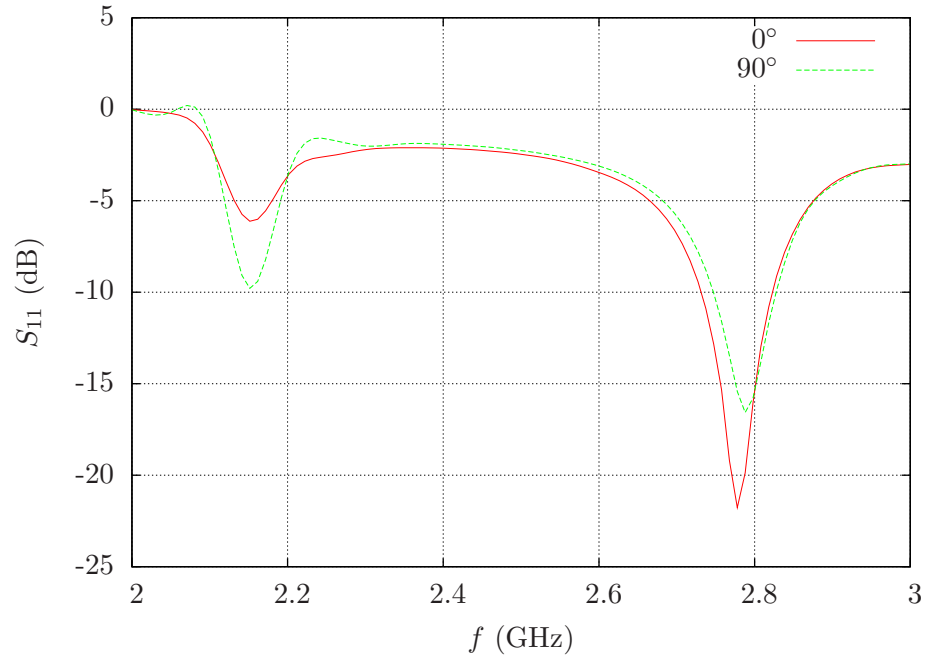


FIG. 4.11: Simulation du capteur sous HFSS incluant une couche de peinture. Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'orientation des fibres du carbone.

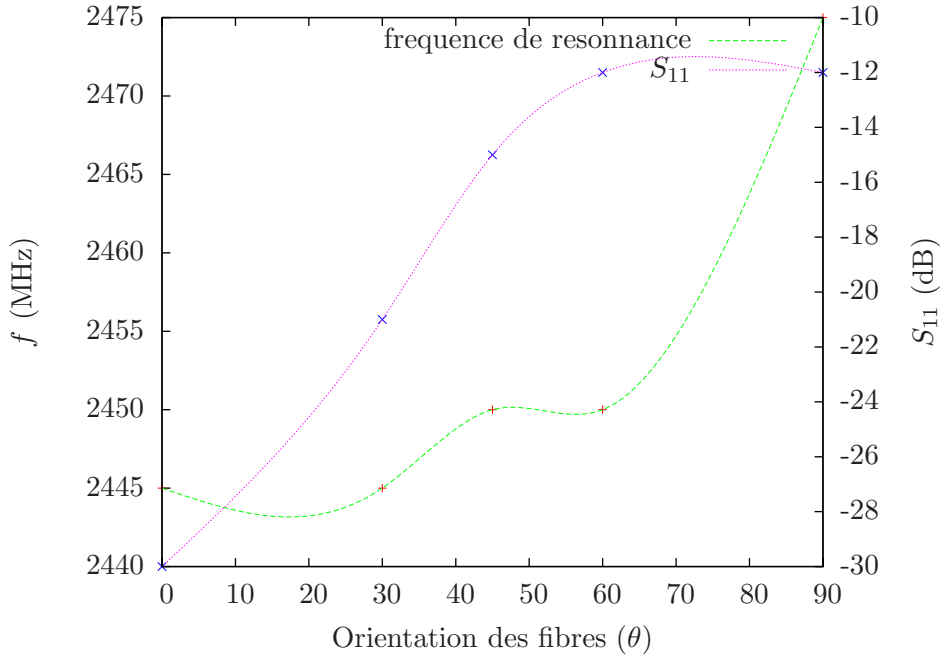


FIG. 4.12: Mesure de la fréquence de résonance sur un composite carbone en fonction de l'orientation du carbone.

visite, c'est-à-dire aux visites pour lesquelles les pièces sont démontées une par une et au contrôle qualité lors de la fabrication des pièces.

Le second point est plus difficile à contourner ; en effet comme nous avons vu au chapitre 3, les composites usuelles carbone souffrent d'une dispersion des caractéristiques de l'ordre de 20% suivant les pièces utilisées. Ce problème peut être contourné en suivant tout au long de la vie du composite les caractéristiques électriques du composite mais cette approche est lourde, sensible à la perte de données et lie de manière quasiment définitive le propriétaire de la pièce à inspecter à la société de contrôle non destructif.

#### 4.4.2 Une mesure d'anisotropie

L'idée est de s'appuyer sur une mesure d'anisotropie afin de mesurer l'état d'endommagement de la pièce en composite. Une première mesure sera faite dans la direction pour laquelle le capteur est le mieux adapté ( $S_1$  minimal) et une seconde perpendiculairement. Les impacts se traduisent bien souvent pas des fractures rectilignes dans la plaque de carbone (voir la figure 4.13 pour un exemple de dégâts liés aux impacts). Les fractures de fibres liés aux impacts perturbent donc les lignes de champs en particulier lorsque le champ est perpendiculaire à la fracture, ce qui bien entendu se retrouvera au niveau du capteur mesurant l'anisotropie (voir la figure 4.14 pour un schéma de principe).

La dispersion de fabrication est quand à elle liée bien souvent à trois types de défauts :

- Un changement dans la qualité de polymérisation de la résine ce qui joue sur sa constante diélectrique et sa conductivité. La résine n'étant pas anisotrope, le ratio entre les deux fréquences mesurés ne changera pas.
- Un changement de quelques pour cents dans la conductivité des fibres. Dans ce cas là, la fréquence de résonance parallèle et perpendiculaire changera quelques peu mais le ratio restera le même, les deux fréquences se décalant du même ordre de grandeur.
- Un changement dans le degré de fibre du composite aura le même résultat que le point précédent.

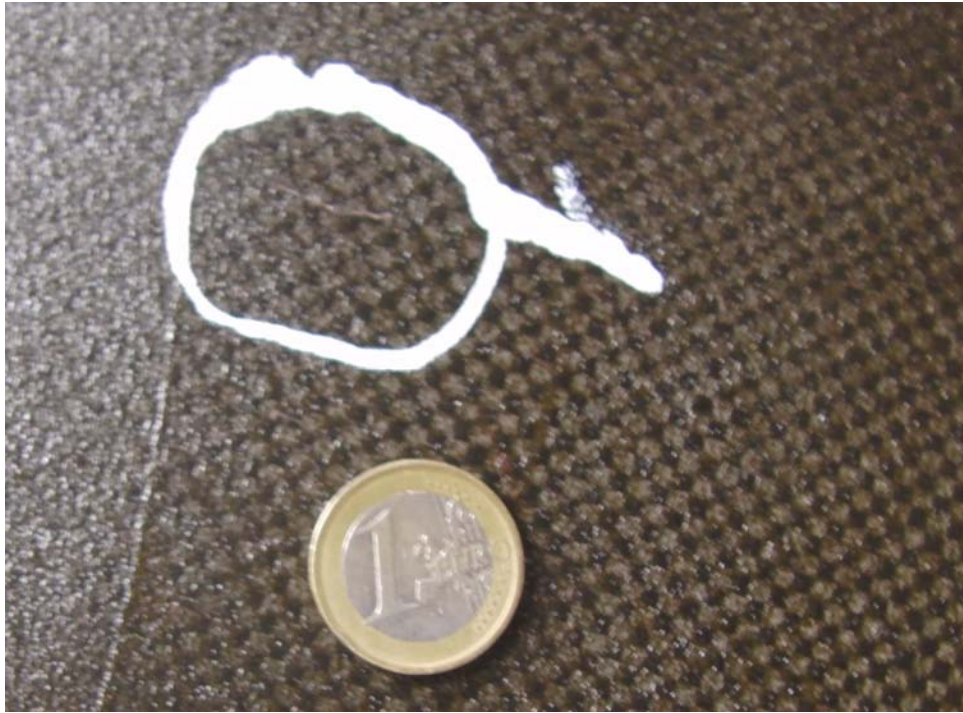
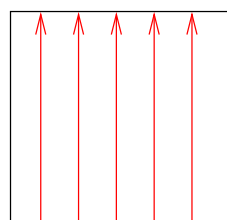
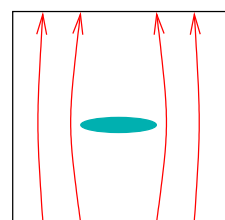


FIG. 4.13: Impact par un objet cylindrique de diamètre 4 cm énergie lors de l'impact 10 J sur une plaque de carbone deux couches.



(a) Ligne de champs sans fracture



(b) Ligne de champs avec fracture

FIG. 4.14: Schéma phénoménologique des lignes de champs dans le cas sans et avec fracture



### 4.4.3 Mesures

Le capteur fabriqué est une variante du précédent (voir photo sur la figure 4.15). En espace libre la hauteur du plan de masse a été réglée afin d'obtenir le maximum de sensibilité. Le capteur a été positionné le long de la plaque et la mesure de la fréquence de résonance a été mesurée dans deux directions donnant la fréquence la plus faible et la plus forte respectivement. Deux impacts successifs d'énergie respective de 5 J et 10 J ont été effectués et la réponse en fréquence a été mesurée. Les impacts sont de type cylindrique et de rayon 3 cm. La plaque de composite étant de type 0/90° et non encastrée lors de l'impact. Les résultats de la mesure sont donnés sur la figure 4.17.

Les résultats sont prometteurs et montrent que les impacts jouent bien sur le rapport de mesure d'anisotropie.

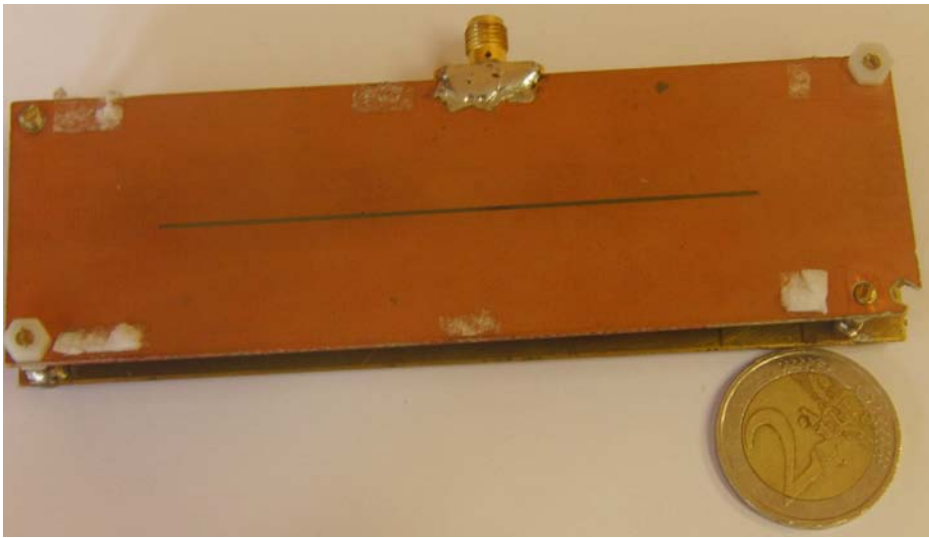


FIG. 4.15: Photographie du capteur slot

### 4.4.4 Construction d'un impacteur

Afin d'éviter plusieurs biais expérimentaux de l'étude précédente il a été mis au point un impacteur respectant le cahier des charges suivant :

- Il réalise des impacts qui n'ont pas de direction privilégié a priori.
- Une énergie d'impact est réglable de manière continue
- Il tient compte de l'énergie perdue lors du rebond.
- des impacts au plus près des normes aéronautique de certifications.
- Une grande reproductibilité.

Le premier point impose que l'impacteur soit sphérique, et de 23 mm pour respecter les normes de style aéronautique. Le deuxième point peut être réalisé en utilisant un système de balancier de longueur  $\ell$  et de masse  $m$  entraîné par la gravité. Le réglage de l'énergie peut ainsi se faire de manière continue en réglant l'angle de libération  $\alpha$ , l'énergie potentielle étant alors si le bras est de masse négligeable  $mg(\ell + \ell \cos \alpha)$ . La mesure de l'énergie perdue lors du rebond se fait à l'aide d'une caméra rapide filmant le rebond. Le schéma de principe est donné par la figure 4.18.

Le balancier était déjà disponible dans le cadre d'un mouton de Charpy [42], nous avons réalisé un impacteur à base de bille sphérique dont les plans sont disponible en annexe B page 141. La taille réduite de l'échantillon impacté nous impose de refaire un capteur d'anisotropie à une fréquence plus élevée.

Le dispositif fonctionne de manière satisfaisante comme le prouve la photographie 4.19.

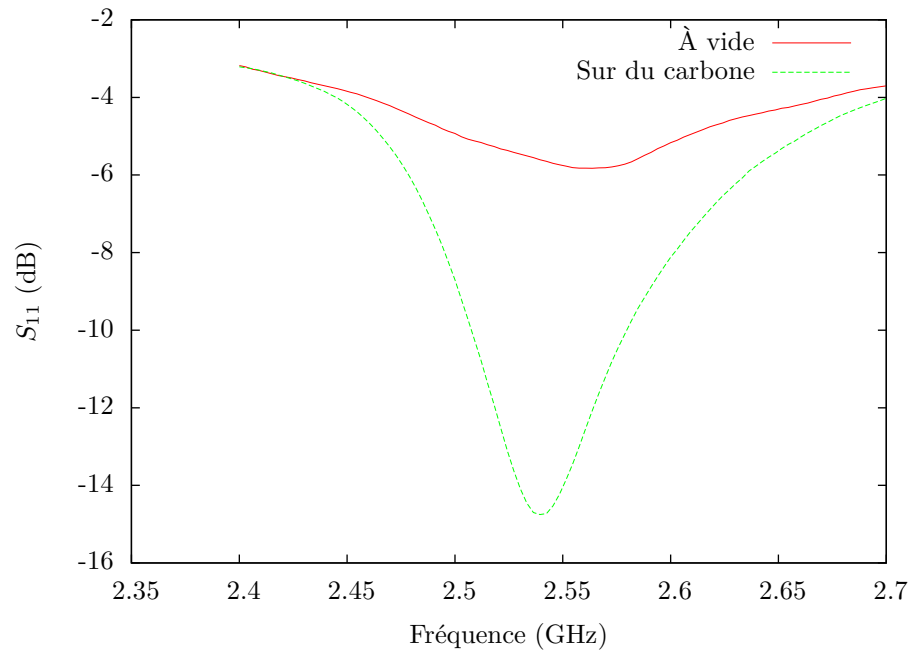


FIG. 4.16: Mesure de la résonance du capteur, à vide et sur du carbone.

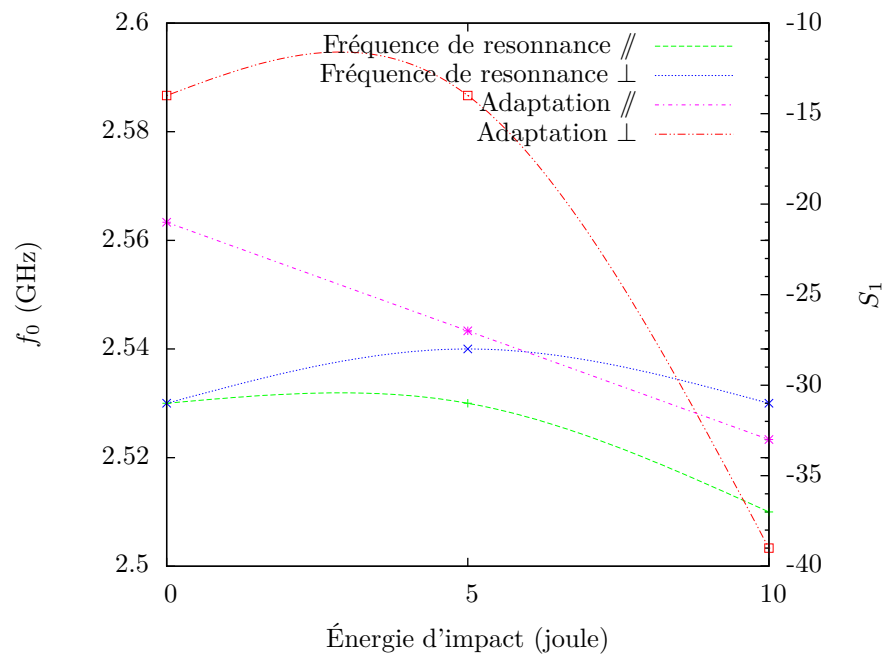


FIG. 4.17: Résultats de la mesure pour deux impacts sur une plaque de carbone

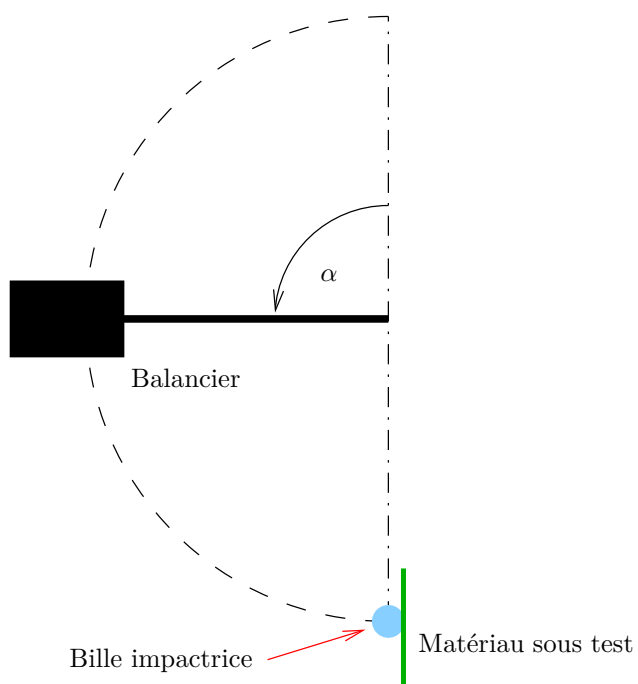


FIG. 4.18: Schéma de principe de l'impacteur

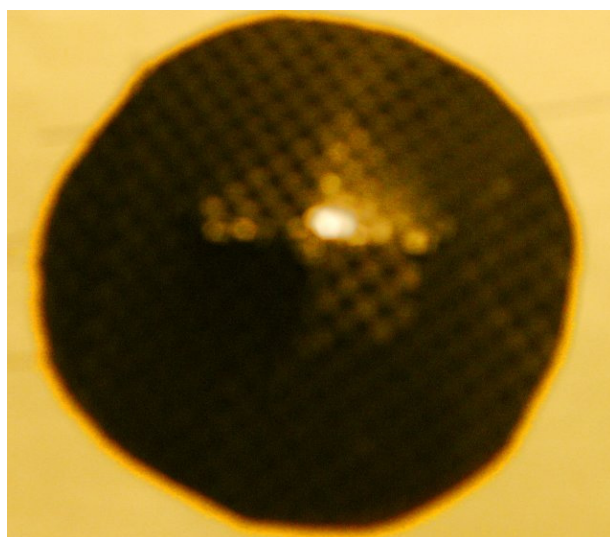


FIG. 4.19: Photographie de l'impact effectué sur une plaque de carbone 0/90 côté opposé à l'impact.

#### 4.4.5 Perspectives et conclusion

Le capteur d'anisotropie est une piste intéressante de détection des impacts sur des composites carbonés. Il apparaît capable de détecter les impacts même minimes. Un autre avantage de ce type de capteur est la simplicité de fabrication qui assurera un coût de fabrication très compétitif vis-à-vis des solutions ultrasonores.

Le capteur peut être miniaturisé en jouant à la fois sur la constante diélectrique du substrat et la fréquence de résonance. En prenant un substrat de constante diélectrique  $\varepsilon_r = 10$  et une fréquence de résonance de l'ordre de 5.8 GHz (bande ISM) le slot aura donc une longueur totale de l'ordre de 1 cm et permettra donc de détecter de manière fine les défauts sur la structure.

La méthode de détection des impacts par mesure anisotropie planaire nous semble particulièrement pertinente. Une étude à grande échelle sur un nombre important de plaques de composites carbone doit être menée pour confirmer les résultats préliminaires. À cet effet un impacteur calibré a été mis au point en collaboration avec le CERIMAT.

### 4.5 Conclusion

Il a été présenté dans ce chapitre trois nouveaux dispositifs de contrôle non destructif, basés sur des méthodes électromagnétiques. Les résultats présentés dans ce chapitre sont prometteurs. Dans le cas du contrôle back scattering, la mise au point d'un capteur industriel pour le contrôle en chaîne de production des composite carbone semble atteignable à court terme. Le contrôle non destructif par mesure d'anisotropie donne des résultats intéressants sur un nombre d'échantillon réduit, et sous réserve de confirmation sur un nombre d'échantillon plus représentatif semble pouvoir être directement appliqué à la détection des impacts sur les avions.

### 4.6 Bibliographie

- [1] Yves SURREL. « Moiré et deflectométrie ». Dans : *Atelier Thématique Photomécanique*. Saint-Etienne : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Cf. p. 46.
- [2] N. FOURNIER et al. « Optical tool for impact damage characterization on aircraft fuselage ». Anglais. Dans : *16th World Conference on NDT*. Montreal, Canada 2004. Cf. p. 46.
- [3] D. K. GHODGAONKAR, V. V. VARADAN et V. K. VARADAN. « Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies ». Dans : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 39.2 (avr. 1990), p. 387–394. ISSN : 0018-9456. DOI : 10.1109/19.52520. Cf. p. 47.
- [4] *Measuring Dielectric Constant with the HP 8510 Network Analyzer. The Measurement of Both Permittivity and Permeability of Solid Materials*. 8510-3. Hewlett Packard. 1985. Cf. p. 47.
- [5] L. F. CHEN et al. *Microwave Electronics. Measurement and Materials Characterization*. 2004. ISBN : 0-470-84492-2. Cf. p. 48, 54.
- [6] D. D. KING. « The Measurement and Interpretation of Antenna Scattering ». Dans : *Proceedings of the IRE* 37.7 (juil. 1949), p. 770–777. ISSN : 0096-8390. Cf. p. 49.
- [7] A. L. CULLEN et J. C. PARR. « A new perturbation method for measuring microwave fields in free space ». Dans : *Proceedings of the IRE* 102B.6 (nov. 1955), p. 836. ISSN : 0096-8390. Cf. p. 50.
- [8] Keigo IZUKA. « A New Technique for Measuring an Electromagnetic Field by a Coil Spring ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 11.6 (nov. 1963), p. 498–505. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 50.
- [9] J. H. RICHMOND. « A Modulated Scattering Technique for Measurement of Field Distributions ». Dans : *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 3.4 (juil. 1955), p. 13–15. ISSN : 0097-2002. DOI : 10.1109/TMTT.1955.1124953. Cf. p. 50.

- [10] W. LIANG et al. « A probe for making near-field measurements with minimal disturbance : the optically modulated scatterer ». Dans : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 45.5 (mai 1997), p. 772–780. ISSN : 0018-926X. DOI : 10.1109/8.575620. Cf. p. 50.
- [11] Milton ABRAMOWITZ et Irene A. STEGUN. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Anglais. ninth Dover printing, tenth GPO printing. New York 1964. ISBN : 0-486-61272-4. URL : <http://www.math.sfu.ca/~cbm/aands/> (visité le 01/10/2007). Cf. p. 50.
- [12] Roger F. HARRINGTON. « Field Measurements Using Active Scatterers ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 11.5 (sept. 1963), p. 454–455. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 50.
- [13] Hing Kiu KAN et R. B. WATERHOUSE. « Shorted spiral-like printed antennas ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 50.3 (mar. 2002), p. 396–397. ISSN : 0018-926X. DOI : 10.1109/8.999633. Cf. p. 53.
- [14] N. T. PHAM, Gye-An LEE et F. DE FLAVIIS. « Minimized dual-band coupled line meander antenna for system-in-a-package applications ». Dans : *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, t. 2. Monterey, California, USA 2004, p. 1451–1454. DOI : 10.1109/APS.2004.1330461. Cf. p. 53.
- [15] Bastien ROUCARIÈS et al. « Antenna backscattering and application to a cost effective non destructive testing method of carbon composites ». Anglais. Dans : *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. 331.7. Charleston, SC, USA 2009. Cf. p. 53.
- [16] William L. JAMES, You-Hsin YEN et Ray J. KING. *A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle wood*. Rap. tech. FPL-0250. Madison, WI, USA : United States Department of Agriculture. Forest Service, 1985. Cf. p. 54.
- [17] Anders P. KAESTNER et Lars B. BÅÅTH. « Microwave polarimetry based wood scanning ». Anglais. Dans : *Proceedings of the 12th International symposium on nondestructive testing of wood*. University of Western Hungary, Hungary 2000. Cf. p. 54.
- [18] Ann FRANCHOIS, Yolanda PIÑEIRO et Roger H. LANG. « Microwave permittivity measurements of two conifers ». Dans : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36 (sept. 1998), p. 1384–1395. ISSN : 0196-2892. DOI : 10.1109/36.718840. Cf. p. 54.
- [19] David GALT et al. « Ferroelectric thin film characterization using superconducting microstrip resonators ». Dans : *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5.6 (juin 1995), p. 2575–2578. ISSN : 1051-8223. DOI : 10.1109/77.403116. Cf. p. 54.
- [20] Junghyun SOK et al. « Characterization of ferroelectric BaSrTiO<sub>3</sub> thin films using a flip-chip technique at microwave frequency ranges ». Dans : *Japanese Journal of Applied Physics* 39.5A (mai 2000), p. 2752–2755. ISSN : 0021-4922. Cf. p. 54.
- [21] C. Y. TAN et al. « Nondestructive microwave permittivity characterization of ferroelectric thin film using microstrip dual resonator ». Anglais. Dans : *Review of Scientific Instruments* 75.1 (jan. 2004), p. 136–140. ISSN : 0034-6748. DOI : 10.1063/1.1632999. Cf. p. 54.
- [22] N. G. ALEXOPOULOS. « Integrated-Circuit Structures on Anisotropic Substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 33.10 (oct. 1985), p. 847–881. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 54.
- [23] Erwan SALAHUN et al. « A broadband permeameter for “in situ” measurements of rectangular samples ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Magnetics* 37.4 (juil. 2001), p. 2743–2745. ISSN : 0018-9464. DOI : 10.1109/20.951293. Cf. p. 55.
- [24] Masahiro GESHIRO, Seikou YAGI et Shinnosuke SAWA. « Analysis of slotlines and microstrip lines on anisotropic substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 39.1 (jan. 1991), p. 64–69. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/22.64606. Cf. p. 54.

- [25] K. C. GUPTA, Ramesh GARG et Inder BAHL. *Microstrip lines and slotlines*. 1<sup>re</sup> éd. Artech House, 1979. ISBN : 0-89006-074-6. Cf. p. 55.
- [26] K. C. GUPTA et al. *Microstrip lines and slotlines*. 2<sup>e</sup> éd. Artech House, 1996. ISBN : 0-89006-766-X. Cf. p. 55.
- [27] Elisa FRATTICCIOLI et Marco DIONIGI. *Resonant sensors for complex permittivity measurements*. Rap. tech. University of Perugia, 2004. URL : [http://www.diei.unipg.it/MEL/mel\\_articoli/microwave\\_resonant\\_sensors.pdf](http://www.diei.unipg.it/MEL/mel_articoli/microwave_resonant_sensors.pdf) (visité le 01/10/2007). Cf. p. 55.
- [28] Guido GENTILI, Cristiano RIMINESI et Vasco TESI. « Low Cost Microwave Sensor for Moisture Content Measurement in Paper Milling Industry ». Dans : *Sensing and Imaging* 7.4 (déc. 2006), p. 155–173. ISSN : 1557-2064. DOI : 10.1007/s11220-006-0027-2. Cf. p. 55.
- [29] E. FRATTICCIOLI et al. « Monitoring moisture content in composting systems using a planar resonant sensor ». Dans : *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. T. 1. IEEE, 2004, p. 339–342. ISBN : 0-7803-8249-8. DOI : 10.1109/IMTC.2004.1351058. Cf. p. 55.
- [30] S. B. COHN. « Slot-Line Field Components ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 20.2 (fév. 1972), p. 172–174. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 55.
- [31] S. B. COHN. « Slot Line on a Dielectric Substrate ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 17.10 (oct. 1969), p. 768–778. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/TMTT.1969.1127058. Cf. p. 55.
- [32] E. FRATTICCIOLI, M. DIONIGI et R. SORRENTINO. « A simple and low-cost measurement system for the complex permittivity characterization of materials ». Dans : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 53.4 (août 2004), p. 1071–1077. ISSN : 0018-9456. DOI : 10.1109/TIM.2004.830753. Cf. p. 55, 56.
- [33] R. GARG et K. C. GUPTA. « Expressions for Wavelength and Impedance of a Slot-line ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 24.8 (août 1976), p. 532–532. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 55.
- [34] R. JANASWAMY et D. H. SCHAUBERT. « Characteristic Impedance of a Wide Slotline on Low-Permittivity Substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 34.8 (août 1986), p. 900–902. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 55.
- [35] Ramesh GARG. « The Effect of Tolerances on Microstripline and Slotline Performances ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 26.1 (jan. 1978), p. 16–19. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 55.
- [36] T. Q. HO et B. BEKER. « Dispersive properties of grounded slotlines and edge coupled microstrip lines on biaxial substrates ». Dans : *IEEE MTT Microwave Symposium Digest*. Boston, MA, USA 1991, p. 217–220. ISBN : 0-87942-591-1. DOI : 10.1109/MWSYM.1991.146966. Cf. p. 55.
- [37] T. Q. HO et B. BEKER. « Effects of misalignment on propagation characteristics of transmission lines printed on anisotropic substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 40.5 (mai 1992), p. 1018–1021. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/22.137413. Cf. p. 55.
- [38] Yinchao CHEN et B. BEKER. « Spectral-domain analysis of open and shielded slotlines printed on various anisotropic substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 41.11 (nov. 1993), p. 1872–1877. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/22.273411. Cf. p. 55.
- [39] Yinchao CHEN et B. BEKER. « Analysis of complementary unilateral slot and strip resonators printed on anisotropic substrates ». Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 43.7 (juil. 1995), p. 1605–1607. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/22.392922. Cf. p. 55.

- [40] E. FRATTICCIOLI, M. DIONIGI et R. SORRENTINO. « A planar resonant sensor for the complex permittivity characterization of materials ». Dans : *Microwave Symposium Digest*. T. 2. Seattle, WA : IEEE MTT-S International, 2002, p. 647–650. ISBN : 0-7803-7239-5. DOI : 10.1109/MWSYM.2002.1011704. Cf. p. 56.
- [41] Bastien ROUCARIÈS et Jacques DAVID. « Méthode de caractérisation micro-onde de composites carbone – Application au controle non destructif ». Dans : *10emes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux*. O9-3. Limoge, France 2008. Cf. p. 56.
- [42] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Charpy Impact Test*. 2009. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charpy\\_impact\\_test](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charpy_impact_test) (visité le 01/07/2009). Cf. p. 60.

## Deuxième partie

# Détection des liquides dans le composites alvéolaires





## Chapitre 5

# Principes et étude de faisabilité d'une nouvelle méthode multiphysique

### Table des matières

5.1	La détection de l'eau une tâche difficile . . . . .	69
5.2	Présentation de la solution innovante . . . . .	71
5.3	État de l'art des méthodes non destructives . . . . .	71
5.3.1	Les méthodes ultrasonores ou vibratoires . . . . .	73
5.3.2	Couplage électromagnétisme-mécanique vibratoire . . . . .	73
5.3.3	Non linéarités mécaniques et contrôle non destructif . . . . .	75
5.3.4	Conclusion . . . . .	75
5.4	Le RADAR Continuous wave . . . . .	76
5.4.1	Principe du radar . . . . .	76
5.4.2	Les applications . . . . .	76
5.4.2.1	Le RADAR routier . . . . .	76
5.4.2.2	Les RADAR de détection de mouvement . . . . .	76
5.4.3	Sensibilité du RADAR CW . . . . .	78
5.4.4	Éléments sur le bilan de liaison . . . . .	79
5.4.5	Conclusion . . . . .	80
5.5	Réponse fréquentielle du composite . . . . .	80
5.5.1	Théorie élastique classique . . . . .	81
5.5.2	Réponse non-linéaire d'un solide . . . . .	82
5.5.3	Cas de l'élasticité finie . . . . .	82
5.5.4	Phénomène hystérétique . . . . .	82
5.5.5	Non linéarité au niveau des contacts . . . . .	83
5.5.6	Conclusion . . . . .	83
5.6	Le dispositif d'étude . . . . .	83
5.7	Perspectives . . . . .	85
5.7.1	Électronique . . . . .	85
5.7.2	Mécanique . . . . .	85
5.8	Conclusion . . . . .	86
5.9	Bibliographie . . . . .	86

### 5.1 La détection de l'eau une tâche difficile

Comme nous l'avons vu dans l'introduction générale, l'eau est un véritable poison pour les composites, les détruisant de manière très importante ce qui a de fortes répercussions sur la sécurité

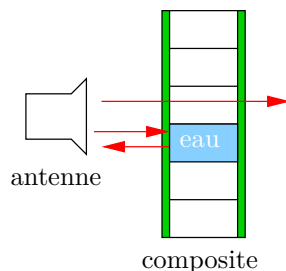


FIG. 5.1: Schéma de principe de la mesure RF de détection de l'eau. En présence d'eau l'onde électromagnétique est réfléchie alors qu'en absence d'eau l'onde est transmise.

de l'aéronef.

La présence de l'eau est à l'heure actuelle difficilement détectable<sup>①</sup> par des moyens ultrasonores [1]. L'écho dû à l'interface solide liquide est très faible, d'autant plus que la cellule est rarement complètement remplie d'eau. En outre la grande rigidité mécanique du carbone favorise un comportement de type guide d'onde, ce qui, encore une fois, empêche une détection efficace.

De même les mesures de réflexion radar (voir par exemple les brevets [2–4]), méthode employée avec succès dans le cas des pièces en fibres de verre, ne permet pas de détecter l'eau dans les composites carbonés. Dans le cas de la fibre de verre cette méthode est efficace en effet l'eau réfléchit de manière totale l'onde électromagnétique alors que la fibre de verre est quasiment transparente (voir schéma de principe sur la figure 5.1). Cependant cette méthode n'est pas applicable au composite carbone pour deux raisons :

- La forte conductivité du carbone introduit une forte atténuation du signal radar, diminuant ainsi le rapport signal à bruit. De même du fait de la grande différence d'impédance d'onde une grande partie du signal sera perdue au niveau des interfaces carbone/air et air/carbone.
- La réflexion au niveau de l'interface carbone eau sera faible du fait des impédances d'onde proche de ces matériaux.

D'après diverses sociétés spécialisées dans le contrôle non destructif, aucune des méthodes efficaces sur les matériaux à base fibre de verre n'a pu être transposée à l'heure actuelle sur la fibre de carbone. Une méthode de substitution basée sur un test de type cinématique thermique a été mise au point afin d'essayer de répondre à cette problématique [5]. Cette méthode consiste à maintenir à une certaine température supérieure à l'air ambiant le matériau à tester, et à mesurer à l'aide d'une caméra thermique la vitesse à laquelle chacune des parties de la pièce atteint la température ambiante<sup>②</sup>. L'eau possédant une très forte capacité thermique, les cellules remplies d'eau auront donc tendance à se refroidir plus lentement. Malheureusement les résultats sont insuffisants car le support nécessite d'être exempt de défauts de fabrication (ponts de résine...), suffisamment plan, et le taux de faux positifs ou de faux négatifs est trop important par rapport aux risques encourus. Ce processus est en outre difficilement tropicalisable, ce qui empêche de le déployer dans les centres de contrôle bas coût de Singapour ou d'Inde, ou tout simplement au plus près de la demande d'inspection c'est-à-dire sur les aéroports de ces pays.

Des méthodes lourdes en terme de capital et de moyens peuvent aussi être utilisées, comme par exemple des méthodes de type IRM [6], rayon X, ou encore neutronique qui sont aussi possibles. En plus de leur coût en capital et en frais de fonctionnement très important, ces méthodes posent des problèmes au point de vue de la sécurité et de la santé des travailleurs.

Les méthodes présentées dans le chapitre précédent ne peuvent pas être directement utilisées. En effet, la méthode par backscattering nécessite l'accès au deux côtés de la pièce ce qui n'est pas possible sur toutes les pièces, en particulier sans démonter. Dans le cas de la méthode par mesure de l'anisotropie, l'onde électromagnétique ne pénètre pas assez pour détecter l'eau située au fond de la cellule.

<sup>①</sup>Ce qui d'ailleurs a poussé un des acteurs principaux dans le domaine du contrôle non destructif à nous contacter.

<sup>②</sup>Ou, plus exactement, tend vers la température ambiante car la décroissance est asymptotiquement exponentielle.

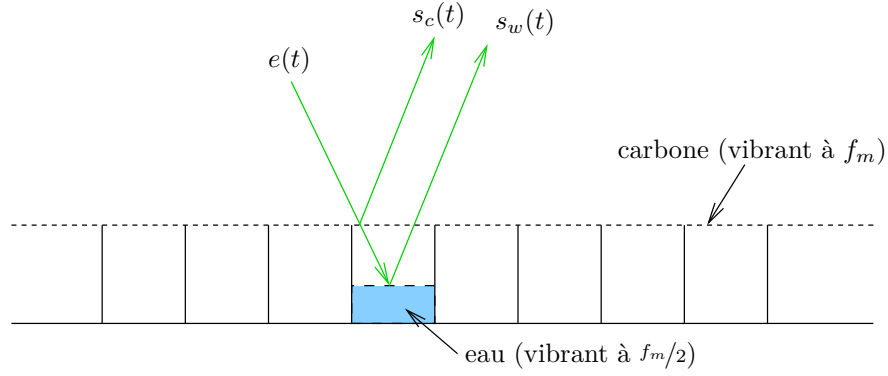


FIG. 5.2: Principe du dispositif de mesure. Une onde électromagnétique  $e(t)$  détecte la vibration mécanique de l'eau à  $f_m/2$ .  $s_c(t)$  est le signal électromagnétique modulé par la vibration mécanique de la structure (à  $f_m$ ) et  $s_w(t)$  est le signal modulé par la goutte d'eau (majoritairement à  $f_m/2$ ).

Les nouveaux avions de type A350 seront composés pour plus de moitié de composites ; ce problème de détection de l'eau devient de plus en plus critique.

## 5.2 Présentation de la solution innovante

Il a été proposé, afin de résoudre ce problème, de réaliser un dispositif innovant couplant mécanique et électromagnétisme. Ce dispositif consiste à détecter les non-linéarités vibratoires de l'eau dans les alvéoles par un radar de type ondes continues (radar CW), combinant ainsi une mesure vibratoire avec une mesure électromagnétique (cf fig 5.2)

Le radar mesure, malgré les pertes importantes à la traversée du carbone, l'état de surface de la goutte d'eau. Cette mesure est basée sur une différence de phase entre l'onde émise et l'onde reçue. Le radar CW a été choisi à cause de sa simplicité de mise en œuvre et sa facilité d'intégration dans des dispositifs compacts.

Il est particulièrement intéressant, pour des questions de rapport signal à bruit, de cibler le phénomène des ondes de Faraday (onde de surface de type sous harmonique) à la surface de l'eau ; en effet, ces ondes génèrent des sous harmoniques, ce qui permet aisément, dans le plan des fréquences de séparer l'excitation mécanique de la structure (vibrant à une fréquence  $f_m$ ) représenté par le signal  $s_c(t)$  sur la figure 5.2, des vibrations de la goutte d'eau (majoritairement en  $f_m/2$ ) représenté par le signal  $s_w(t)$ . Cette technique a fait ses preuves sur un modèle expérimental simple constitué d'un tube vibrant verticalement (voir photographie sur la figure 5.3) qui a donné des résultats très prometteurs qui sont présentés plus en détail dans le chapitre expérimental. Ce dispositif a fait l'objet d'un dépôt de brevet [7]. Un autre avantage de ce type d'onde est de permettre de s'affranchir des problèmes de bruit liés aux non linéarités mécaniques : les non linéarités mécaniques génèrent uniquement des harmoniques et non des sous harmoniques comme nous le verrons par la suite.

Les ondes de Faraday, à la base de ce dispositif innovant, sont des ondes de surface non linéaires qui apparaissent dans un réservoir soumis à une vibration verticale. Ces ondes créent un motif d'onde stationnaire de fréquence égale à la moitié de la fréquence de forçage [8]. Les motifs de surface de ces ondes sont assez curieux, il peuvent être soit en forme de chevron, soit hexagonaux, soit carrés et même quasi cristallins (voir fig. 5.4). Si l'amplitude du forçage mécanique est trop forte, alors le motif d'onde stationnaire est brisé et le régime d'onde de surface devient chaotique.

## 5.3 État de l'art des méthodes non destructrices

Le but de cette section est de présenter les diverses méthodes utilisées afin de détecter l'eau mais aussi les diverses méthodes ou techniques multiphysiques couplant vibrations et électroma-

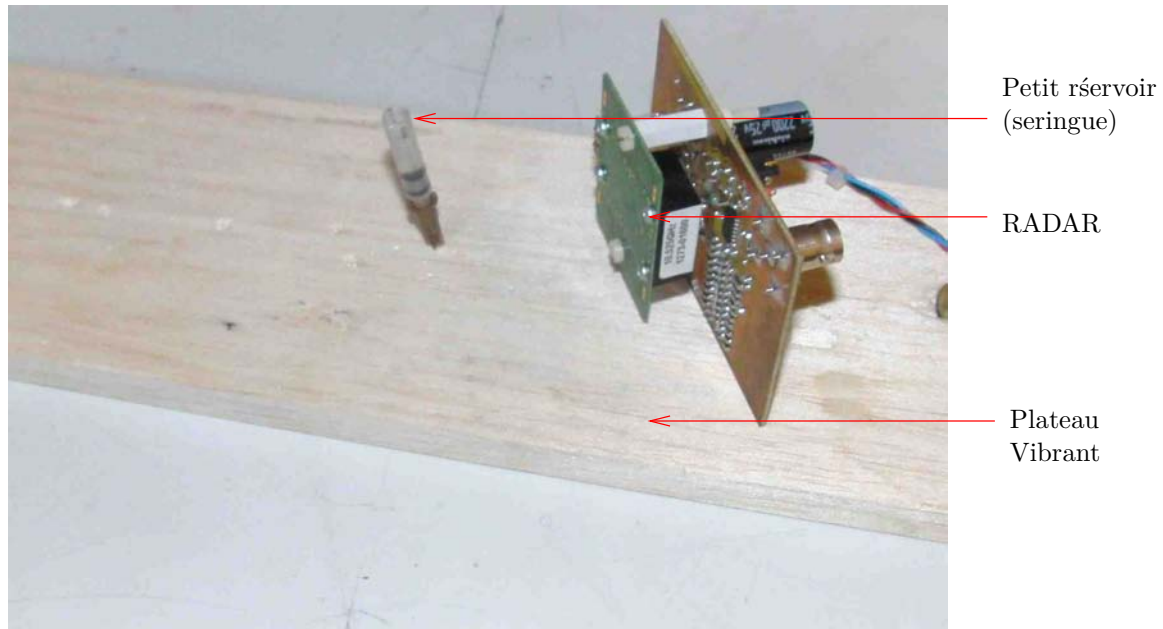


FIG. 5.3: Photographie du modèle expérimental simple

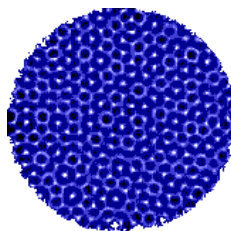


FIG. 5.4: Onde de Faraday dans un grand réservoir. Motif quasipériodique [9]

gnétisme. Nous présenterons aussi les diverses utilisations des non linéarités mécaniques dans le cadre du contrôle non destructif.

### 5.3.1 Les méthodes ultrasonores ou vibratoires

Les méthodes ultrasonores sont basées sur la mesure des caractéristiques de propagations d'onde sonore dans un corps à étudier. Les ondes sonores, sont réfléchies, atténuées, ou dispersées lors de la traversée du corps étudié, ce qui permet donc avec une certaine fidélité de reconstruire les interfaces et la nature du corps à étudier. L'exemple le plus marquant de ce type de méthode est bien entendu les échographies médicales en particulier obstétrique.

Une autre méthode proche est la méthode vibratoire. Un corps est soumis à une vibration, et l'on mesure alors la fréquence de résonance. L'objet intact possède une fréquence de résonance connue, alors que l'objet défaillant subira un léger décalage de cette fréquence. Cette mesure peut être faite à l'oreille à l'aide par exemple d'un marteau. Un des exemples les plus connus de cette méthode est le test des obus d'artillerie à l'aide d'un petit choc au marteau, permettant ainsi de détecter les criques pouvant amener à l'explosion de l'obus dans le canon<sup>①</sup>.

Dans le cadre de la détection de l'eau à l'exception des remarques orales des sociétés de contrôle non destructifs présentées au début de ce chapitre et le brevet [1], la seule méthode spécifique que nous ayons trouvée dans la littérature est une méthode faisant intervenir une analyse multifréquence. Le brevet [10] décrit une méthode permettant par analyse vibratoire de déterminer le type, la quantité et le type de fluide en présence dans une cavité. Cette méthode est basée sur une analyse interférométrique de la vitesse du son et de l'atténuation des ondes ultrasonores à diverses fréquences. Cette méthode ne semble pas avoir donné lieu à commercialisation.

Les méthodes ultrasonores nécessitent aussi d'utiliser du gel entre le transducteur ultrasonore et la pièce à inspecter, enfin d'améliorer la sensibilité du dispositif. La superficie des ailes d'un A380 étant de l'ordre de 845 m<sup>2</sup>, la quantité de gel nécessaire même à raison d'une couche de 1 mm est importante et représente donc un coût non négligeable.

### 5.3.2 Couplage électromagnétisme-mécanique vibratoire

L'idée de base de notre dispositif est d'utiliser un couplage électromagnétisme-mécanique vibratoire afin d'améliorer le seuil de détection. En effet, la mesure radar seule du fait des pertes dans le carbone ne donne pas des résultats satisfaisants. La mesure vibratoire module la mesure radar et permet de discriminer dans le plan des fréquences les différents motifs de vibrations et ainsi de détecter dans notre cas la réponse spécifique de l'eau. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la vibration mécanique induit une modulation de la longueur géométrique vue par l'onde électrique soit une modulation de type FM au niveau de l'onde électromagnétique (voir l'équation (4.16)), soit avec les notations présentées dans le chapitre 4 :

$$s(t) = Ae^{j\omega t + 2j\beta\ell} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} J_k(2\beta A_m) e^{jk\omega_m t} \quad (5.1)$$

Avec  $\omega$  la pulsation électrique,  $\omega_m$  la pulsation mécanique,  $A_m$  l'amplitude mécanique,  $\beta$  la constante de phase de l'onde électromagnétique et  $\ell$  la longueur géométrique entre le radar et la surface vibrante. Cette mesure de vibration dite encore micro doppler<sup>②</sup> est assez ancienne. À titre d'exemple, un dispositif micro doppler micro ondes est décrit dans [13], ou encore dans [14] dans le domaine des alarmes de sécurité. L'analyse théorique de cet effet est donnée par [15, 16]. Dans le cas réel, où les vibrations ne sont pas strictement perpendiculaires au plan de l'onde électromagnétique et où l'objet peut être en rotation, le spectre est beaucoup plus compliqué ; néanmoins il est toujours possible de retrouver en bande de base la fréquence de vibration de l'objet (et des surharmoniques). Le traitement du signal peut être un simple montage démodulateur comme on

<sup>①</sup>Bien que cette méthode fût décrite de manière humoristique dans un film muet de Charlie Chaplin, elle a été utilisée avec succès durant les deux guerres mondiales.

<sup>②</sup>Un micro doppler est un radar doppler dans lequel la vibration est petite comparée à la longueur d'onde. Son utilisation est assez récente comparée au radar doppler classique qui est utilisé au moins depuis les années 1940 [11, 12].

en trouve des milliers dans les radios analogiques ou être plus subtil comme, par exemple, en utilisant des transformées de type temps-fréquences comme par exemple la pseudo-transformée de Wigner-Ville moyennée [16].

L'idée d'utiliser une méthode couplée faisant intervenir à la fois une mesure vibratoire et une mesure électromagnétique est assez ancienne et peut être retracée au contrôle non destructif des pneumatiques, en particulier des défauts de fabrication. Cette idée dérive de l'idée plus ancienne encore dans lequel le pneumatique à examiner par une méthode ultrasonore est mis en rotation afin de détecter par un effet doppler le défaut [17]. L'approche RF [18] est alors le prolongement naturel de cette méthode ultrasonore, tout ayant bien sûr l'avantage d'être sans contact et donc plus économique. Ce brevet à fait l'objet de plusieurs améliorations mineures ces dernières années [19, 20] de la part de la société Michelin<sup>①</sup>. Il est même possible dans le cas des pneumatiques d'induire une vibration sans contact en utilisant électro-aimant [21]; en effet la bande de roulement des pneumatiques est armée de fils d'acier qui sont magnétiques et peuvent être mis en vibration par un simple effet magnétique.

Un concept assez proche de notre idée est la détection de mines antipersonnelles (en particulier les mines dite plastiques non détectables au détecteur de métaux) par un couplage mécanique–électromagnétisme. Le champ de mines est mis en vibration et les mines sont détectées par radar doppler, mettant en évidence leur réponse vibratoire particulière. En effet les mines antipersonnelles sont des objets rigides incorporés dans un matériaux beaucoup plus souple. De plus les mines sont généralement des objets de forme cylindrique et possèdent donc de fortes résonances mécaniques, qui se différencient des éléments naturels enfouis dans le sol<sup>②</sup>. Le sol serait mis en vibration par des camions vibreurs et les mines détectées par un radar passant au-dessus du champs de mine, sans doute suspendu par un câble. Cette méthode fait l'objet de plusieurs brevets [22–27] et est développée activement par le Geogia Tech Institute sur les fonds de l'armée américaine. Les auteurs de ces différents brevets n'utilisent pas néanmoins des signaux de type sous harmoniques. En plus de ce principe physique de couplage, l'équipe de Geogia Tech a aussi développé des capteurs RF à haute résolution spatiale [28], permettant ainsi de localiser de manière plus précise les mines. L'étude globale du phénomène de couplage est étudiée à l'aide de la FDTD dans la thèse de SCHRÖDER [29]. La méthode de type FDTD est la mieux adapté à ce genre de problème car elle permet de modéliser facilement le couplage de la mécanique vibratoire avec la modélisation radiofréquence. Cette méthode est aussi décrite en détail dans [30–34]. Le signal acoustique est impulsionnel et le traitement du signal radio est assez simple (basé sur un calcul d'énergie réfléchie) mais suffisamment robuste pour obtenir de très bons résultats [35]. Des images en fausses couleurs des résultats obtenus sont reproduites sur la figure 5.5.

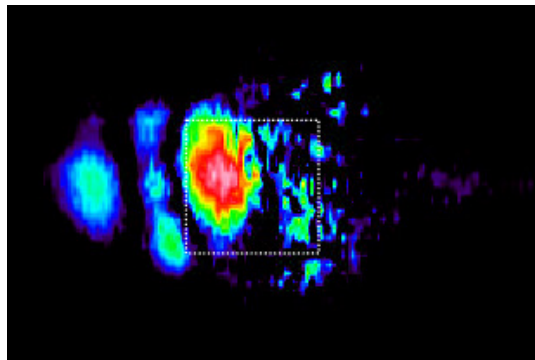


FIG. 5.5: Méthode acousto-électromagnétique : détection d'une mine [30]. Image obtenue après traitement du signal, cas expérimental, la mine (factice) étant en pointillé.

Dans le cadre de la détection de liquide, il existe aussi une famille de brevets [36, 37] qui utilise

<sup>①</sup> La méthode RF présente l'avantage dans le cas des pneumatiques de pouvoir être effectuée in situ en faisant tout simplement tourner la chaîne de roulement. La méthode est ainsi très élégante et particulièrement économique.

<sup>②</sup> Il convient de noter que de l'avis de l'auteur, les ingénieurs en armement inventeront rapidement des mines avec des formes plus compliquées afin d'éviter les fortes résonances mécaniques si cette méthode est un jour déployée.

le couplage d'une excitation vibratoire et d'une mesure RF afin de déterminer en fonction de la réponse vibratoire de la frontière d'un récipient la pression à l'intérieur de ce même container. Le mécanisme à l'œuvre est encore une fois un changement de la fréquence de résonance vibratoire du récipient à cause de la présence de fluides (ou même à la rigueur de solide).

Le couplage électromagnétisme-mécanique vibratoire présenté dans cette section est bien entendu totalement différent de la mesure effectuée à la fois par des moyens mécaniques et par des moyens électromagnétiques, comme par exemple dans le brevet [38, 39]<sup>①</sup>.

### 5.3.3 Non linéarités mécaniques et contrôle non destructif

Le deuxième point dur de notre dispositif est l'excitation de non linéarités mécaniques. Les méthodes ultrasonores non linéaires sont bien connues en particulier la génération de superharmoniques c'est à dire une réponse fréquentielle en  $nf_0$ ,  $n \in \mathbb{N}$  en réponse à une excitation en  $f_0$ . Ces méthodes permettent de détecter assez efficacement un certain nombre de défauts [40, 41] et donne encore de nos jours lieu à publication et recherche. Ce type de technique permet en particulier de détecter les fractures même si elles sont très petites comparées à la longueur d'onde acoustique [42–44] et son utilisation est en cours d'évaluation dans l'industrie nucléaire afin de détecter les défauts sur les enveloppes des barres d'uranium [45]. Ce comportement est lié comme nous le verrons dans le chapitre suivant à deux phénomènes :

- Le caractère non linéaire des équations de la mécanique des milieux continus.
- Certains types de défauts sont fortement non linéaires.

Le lecteur curieux pourra se référer aux deux documents de synthèse [46, 47].

Une autre utilisation des non linéarités consiste à utiliser la propriété du mélange fréquentiel, c'est à dire le fait qu'exciter la non linéarité par deux fréquences pures ( $f_1$  et  $f_2$ ) crée en sortie du système un signal somme et différence ( $nf_1 \pm mf_2$ ,  $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ ). Cette idée est intéressante car les fréquences sommes et différences ressortent très clairement du bruit et leur détection ne nécessite pas un traitement du signal évolué. En effet les fréquences somme et différence sont séparées très clairement dans le domaine fréquentiel de l'excitation, il suffit alors d'atténuer lors de la mesure l'excitation (afin d'éviter un problème de dynamique) et d'appliquer une simple FFT. Cette technique de détection a été appliquée avec succès à la détection de mine par des moyens ultrasonores [48], l'interface mine-sol étant particulièrement non linéaire. Cette méthode basée sur le mélange de deux composantes fréquentielles par une non linéarité est aussi détaillée dans [49, 50]. Ces techniques sont en particulier très efficaces pour détecter les fractures, des micro-fractures ou des problème d'interfaces [51, 52].

Les non linéarités mécaniques sont utilisées aussi dans le dispositif décrit par le brevet [53–55]. Ce dispositif consiste à faire vibrer une bouteille contenant un liquide et à mesurer la réponse fréquentielle de cette bouteille à l'aide d'un accéléromètre. Ce brevet est néanmoins uniquement basé sur une approche vibratoire et ne comprend pas de mesures par un radar. L'approche vibratoire seule présente un inconvénient majeur, l'eau interagit peu avec les parois dans le cas où la cellule est partiellement remplie et la réponse sera donc faible. Dans le cas où la cellule est complètement ou presque complètement remplie (ce qui semble le cas de la famille de brevet [53]), la réponse sous harmonique provient comme nous le verrons par la suite d'une forte interaction fluide/structure qui se manifeste au niveau de la structure, et non de la réponse particulière du fluide.

### 5.3.4 Conclusion

Les méthodes existantes de contrôle non destructif ne permettent pas de détecter l'eau de manière efficace. Notre méthode basée sur la génération d'une onde hydraulique non linéaire (sous-harmonique) s'inspire de nombreuses méthodes antérieures. Néanmoins, à notre connaissance, aucune des méthodes existantes à l'heure actuelle n'utilise les ondes de Faraday comme moyen de détection de l'eau. La détection de cette onde par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique constitue de même une contribution originale.

---

<sup>①</sup>Bien que cette distinction soit évidente pour l'auteur du manuscrit, elle n'apparaît pas évidente pour l'office des brevets.



## 5.4 Le RADAR Continuous wave

### 5.4.1 Principe du radar

Le RADAR est un dispositif utilisant les ondes radio afin de déterminer la position et/ou la vitesse d'un objet comme par exemple des bateaux ou des avions, ou même des cambrioleurs. La position est mesurée à l'aide du temps de retour de l'onde, et la vitesse à l'aide de la différence de fréquence, mesure dite Doppler.

Le RADAR de type *continuous wave* (CW) [56] est un radar qui émet tout le temps ou quasiment tout le temps. Ce type de radar est très simple et est capable de détecter le décalage de fréquence Doppler dans le signal retourné à partir d'une cible avançant ou s'éloignant du radar. Bien que ce genre de radar ne puisse pas mesurer une distance absolue, il est très utilisé dans les radars routier (police), les détecteur de mouvements, les alarmes antivol, les détonateurs de proximités de missile, les système de guidage radar (comme le système sol-air Hawk).

Le principe de fonctionnement est très simple, une onde émise est multipliée avec l'onde reçue. Dans notre cas d'étude c'est-à-dire le cas de la mesure d'une vibration, nous obtenons encore une fois l'équation (4.16)), soit avec les notations présenté dans le chapitre 4 :

$$s(t) = Ae^{j\omega t + 2j\beta\ell} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} J_k(2\beta A_m) e^{jk\omega_m t} \quad (5.2)$$

Le signal vibratoire est donc en bande de base très facile à discriminer par une simple démodulation FM ou même en récupérant la première raie ( $k = \pm 1$ ), c'est à dire en utilisant un simple filtre passe bas. Le schéma de principe dans le cas monostatique et bistatique du RADAR CW est donné par la figure 5.6

Bien entendu, le multiplieur n'est qu'une modélisation des dispositifs pratiques existant. En pratique, la multiplication est effectuée par un mélangeur, c'est-à-dire un dispositif électronique qui possède une caractéristique courant tension non linéaire, bien souvent approximée par une loi quadratique, ainsi un sinus pur générera une harmonique de rang pur, et deux sinus pur de fréquences respectives  $f_1$  et  $f_2$  généreront les fréquences sommes et différences.

### 5.4.2 Les applications

#### 5.4.2.1 Le RADAR routier

Les RADAR routier [57] opère suivant le principe du RADAR CW, bien souvent dans les bandes X à Ka, suivant la réglementation locale sur l'usage des fréquences. Ils émettent suivant un lobe de l'ordre de la quinzaine de degrés et leur sensibilité est suffisante pour effectuer une mesure à 800 m de la cible. La dynamique est large avec des différences de réflexion de 30 dB entre un grand camion et une moto. La distance à la cible n'est pas bien entendu mesurée, ce qui provoque une incertitude sur la cible en train d'être mesurée<sup>①</sup>. Malgré ces limitations ce type de RADAR se vend à plusieurs milliers d'exemplaires et équipe progressivement le bord des routes.

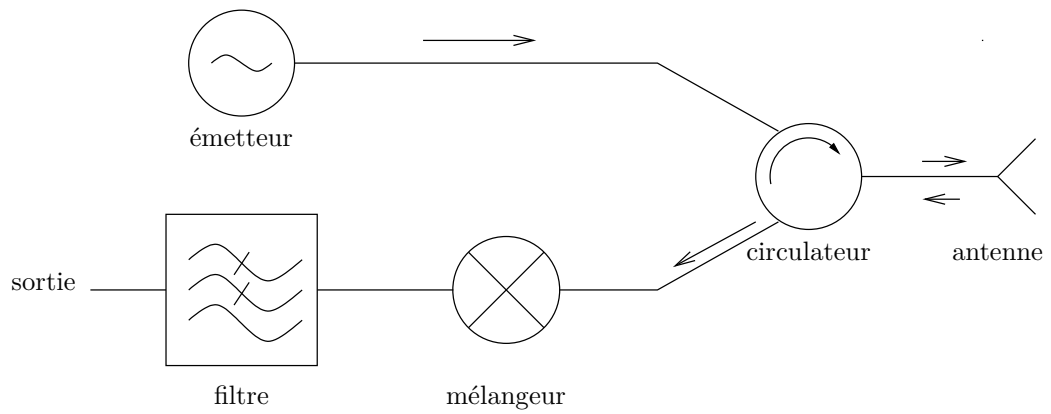
L'émetteur est typiquement un oscillateur à diode Gunn qui émet entre 30 mW et 100 mW, et une antenne à grand gain de l'ordre de 20 dB conçue pour émettre en polarisation circulaire. Afin d'éviter le phénomène de saturation des étages BF (après le filtre BF), la plupart des radars commercialisés utilisent plusieurs étages amplificateur correspondant à la détection des cibles proches lointaine et médianes. La précision est de l'ordre de 1 km/h. Dans le cas d'un radar mobile, la vitesse du véhicule est mesurée à l'aide des réflexions parasites sur le sol et est rajoutée à la vitesse du véhicule cible.

#### 5.4.2.2 Les RADAR de détection de mouvement

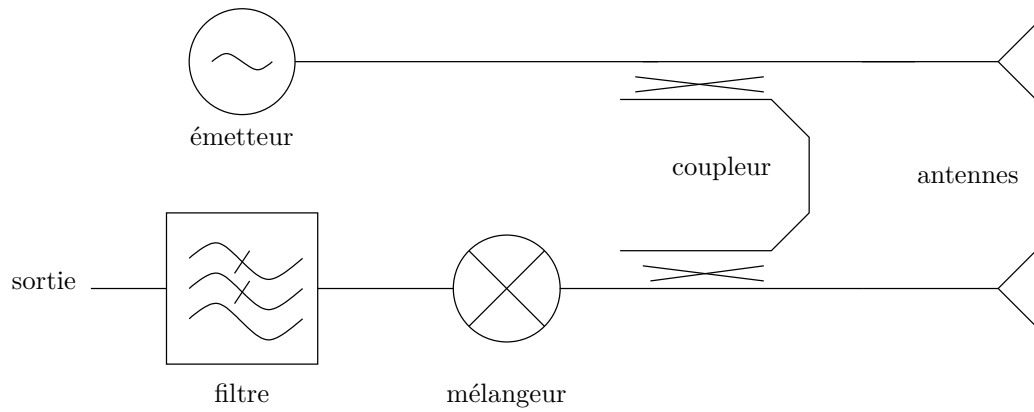
Ce type de radar est utilisé pour détecter les mouvements et ainsi protéger un local des voleurs. Bien souvent le radar est de type bi statique et le coupleur directionnel est simplement fabriqué

---

<sup>①</sup>D'où le nombre de déchets photographique important pour les radars automatiques opérant sur le bord des routes et autoroutes.



(a) Schéma de principe d'un RADAR monostatique.



(b) Schéma de principe d'un RADAR bistatique.

FIG. 5.6: Radar Continuous Wave

à l'aide deux pistes suffisamment proches pour avoir un transfert d'énergie de l'une à l'autre. L'antenne est bien souvent imprimée et de type patch. Le coût d'un tel montage ne dépasse pas bien souvent la dizaine d'euros.

Un autre application de ce type de radar est de détecter les signes de vie dans une pièce [58] et ainsi de prévenir par exemple la mort subite du nourrisson. Un RADAR est ainsi disposé au dessus du lit du bébé et mesure les battements du cœur (qui sont une forme de vibration). En cas d'arrêt de ce signal, une alarme retentit qui force le bébé à re-respirer par réflexe et les parents à entreprendre immédiatement une réanimation. Le grand avantage de cette méthode est qu'elle est sans contact laissant ainsi toute latitude au bébé de bouger et évite de coller des électrodes potentiellement allergisantes sur la peau sensible des nouveaux nés.

### 5.4.3 Sensibilité du RADAR CW

Le radar CW est souvent utilisé afin de d'améliorer la détection. En effet, les bandes Doppler se distinguent particulièrement bien de l'excitation initiale et permette ainsi de discriminer aisément un objet en mouvement. C'est ainsi que l'effet Doppler ultrasonore est utilisé de manière courante dans le domaine médical, afin de mesurer, par exemple, les paramètres cardiaques.

Des exemples de sensibilité de détection de ce type de RADAR sont donnés par la littérature. Comme nous l'avons vu, ce radar est par exemple utilisé pour détecter les battement du cœur au travers de la cage thoracique d'un nouveau né [59]. Les battements de coeur sont dans ce cas là très minimes (de l'ordre du millimètre), et non directement accessibles. En particulier l'onde doit subir une très forte réflexion à la surface de la peau (le corps humain possède un  $\varepsilon_r$  moyen de 50 [60]) et de fortes pertes à la traversé des tissus. Le signal radar détectant le battement du coeur est alors très faible, mais encore mesurable. La recherche sur ce type de radar a commencé dans les années 1970 [61, 62] et s'est développée afin de détecter les personnes ensevelies dessous des gravats lors d'un tremblement de terre à l'aide de la mesure de leur battement de cœur. Il est ainsi possible de mesurer des signes de battements cardiaque à une distance de 30 m [63] et derrière un tas de gravats consistant en des blocs de bétons armés, de la terre humide et de grillage métallique d'une épaisseur de 3 m [64, 65].

Cette utilisation des paramètres biologiques afin de détecter un être humain a aussi trouvé une application dans le domaine militaire. Elle permet de détecter ainsi des tireurs d'élite embusqués derrière les murs [66–68]. Ce type de RADAR est à l'heure actuelle déployé en Irak [69] sous le nom de Radar Scope (voir la figure 5.7). De même, la société KAI sensors transpose [70] son dispositif de mesure pour les nouveaux nés vers une application guerrière permettant de détecter les battements de coeur au travers de mur<sup>①</sup>.

Cette sensibilité exceptionnelle de ce type de RADAR peut être expliqué du fait que le RADAR CW effectue une corrélation entre le signal émis et le signal reçu, se comportant comme un filtre très sélectif. En effet, en utilisant le schéma de la figure 5.6a, en supposant les éléments idéaux et en notant  $e(t)$  le signal émis,  $r(t)$  le signal reçu par l'antenne,  $s(t)$  la sortie du filtre et  $f_c$  la fréquence de coupure du filtre passe bas :

$$s(t) = \frac{1}{f_c} \int_{-\infty}^{\infty} e(t)r(t) \text{sinc } f_c(t - \tau) d\tau \quad (5.3)$$

Supposons maintenant que le signal  $r(t)$  soit composé d'une porteuse de même fréquence que  $e(t) = \cos(\omega t)$  mais d'amplitude et de phase différentes, d'un signal modulé de fréquence inférieure à  $f_c$  (sinus pour simplifier) et d'un bruit blanc gaussien  $b(t)$ , soit  $r(t) = A \cos(\omega t + \varphi) [1 + m \cos(\omega_m t)] + b(t)$  à la sortie du multiplicateur le signal est alors :

$$m(t) = e(t)r(t) = \cos(\omega t) \{ A \cos(\omega t + \varphi) [1 + m \cos(\omega_m t)] + b(t) \} \quad (5.4)$$

$$= \frac{A}{2} [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] [1 + m \cos(\omega_m t)] + b(t) \cos(\omega t) \quad (5.5)$$

Le terme en  $2\omega t$  est éliminé par le filtrage, ne reste plus alors que le terme en  $\cos \phi$ . Le bruit est lui aussi extrêmement filtré n'étant pas, par définition, corrélé à un cosinus pur (au sinus

<sup>①</sup> Elle bénéficie pour cela d'une subvention plus que confortable de \$850000.



FIG. 5.7: Le dispositif de détection de présence au travers des murs RADAR Scope [69].

cardinal près). Ce type de RADAR est donc extrêmement sensible comparé à un RADAR impulsionnel ou le filtrage est beaucoup plus large. Ainsi, on considère en première approximation et empiriquement que le rapport signal à bruit sans post-traitement doit être de l'ordre de 6 dB pour un RADAR CW contrairement à un RADAR impulsionnel où le SNR doit être de l'ordre de 13 dB [71].

#### 5.4.4 Éléments sur le bilan de liaison

La majorité des pertes de signal radar se feront au travers du carbone. Bien que le RADAR soit sensible, il convient de diminuer au maximum ces pertes. D'après, la littérature les pertes seront d'au plus 40 dB dans la bande de fréquence utilisée [72]. Néanmoins, il sera en pratique possible d'obtenir moins de pertes en remarquant qu'une partie importante des pertes est due à la réflexion de l'onde sur le carbone. En effet, la mesure effectuée dans la littérature consiste en fait à déterminer les paramètres d'un blindage, soit la transmission de l'onde électromagnétique au travers de la plaque de carbone à partir d'une onde plane venant de l'espace libre. Ainsi en jouant sur l'adaptation de l'antenne il est possible de mieux coupler l'énergie à la structure. Il convient de noter que les pertes dans les composites carbonés augmentent fortement au delà d'une certaine fréquence, il conviendra donc de travailler en dessous de cette fréquence de coupure.

Il faut aussi tenir compte de l'efficacité de modulation, c'est-à-dire de la fraction d'énergie qui est modulée par effet vibratoire. Cette efficacité a déjà été calculée et vaut approximativement (voir équation (4.17)) :

$$e_m = \frac{2\pi A_m}{\lambda} \quad (5.6)$$

avec  $\lambda$  la longueur d'onde et  $A_m$  la modulation mécanique. Il convient de noter qu'à amplitude fixe, il est intéressant d'augmenter la fréquence du RADAR afin d'augmenter la sensibilité. Néanmoins un compromis est à atteindre entre les pertes à cause de cette conversion et les pertes à cause du carbone.

Il nous faut maintenant rajouter à ces pertes l'influence de la surface équivalente RADAR. Malheureusement à l'heure actuelle il n'existe pas de théorie satisfaisante concernant la réflexion RADAR en zone proche. En première approximation et très mauvaise approximation nous pouvons prendre comme modèle de réflexion celui d'une sphère de diamètre équivalent en zone lointaine, sur laquelle on peut appliquer<sup>①</sup> les résultats de la théorie de Mie [73] (voir figure 5.8). La surface équivalente RADAR est ainsi beaucoup plus petite que la surface projetée dans le cas

<sup>①</sup>En considérant une réflexion totale sur la goutte.

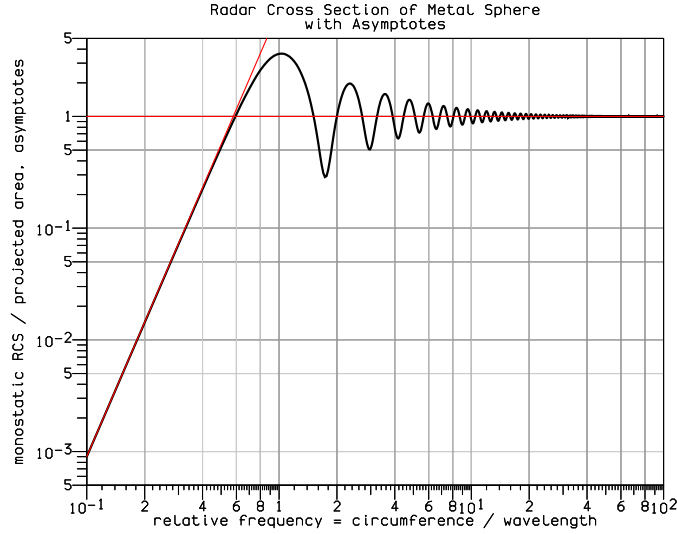


FIG. 5.8: Surface équivalente radar d'une sphère totalement réfléchissante en fonction de la fréquence (normalisée). Aux basses fréquences elle peut être approximée par  $\sigma/(\pi R^2) \approx 9(\beta R)^4$  et aux hautes fréquences par  $\sigma/(\pi R^2) = 1$  [73].

qui nous intéresse c'est-à-dire une goutte de 2.5 mm de rayon. Ainsi afin d'améliorer la sensibilité il conviendra aussi d'augmenter la fréquence électromagnétique de notre RADAR.

Un autre problème plus critique est la saturation des étages de réception à cause de la vibration de la surface de carbone à la fréquence mécanique. Bien qu'il soit possible de filtrer en aval, c'est-à-dire après démodulation en utilisant des dispositifs du même type que les égaliseurs utilisés dans le monde musical, ce filtrage n'empêche pas la compression c'est à dire les distorsions non linéaires dues à la saturation de l'étage mélangeur. Néanmoins il est possible de contourner de manière élégante ce problème, en plaçant cette surface au niveau d'un nœud de radiation, c'est-à-dire à une distance électrique égale à un multiple de  $\lambda/2$  du dispositif émettant. La puissance électromagnétique étant alors nulle au niveau du plan de carbone, la réflexion sera alors minimale, et pourra être aisément filtrée par un approche de type égaliseur sans sacrifier de la dynamique au niveau du mélangeur.

#### 5.4.5 Conclusion

Le radar CW nous apparaît être l'outil de choix pour la détection de la fréquence sous harmonique comme dans notre cas de détection de l'eau. En effet, il possède une très grande sensibilité, filtre de manière efficace le signal dans le plan des fréquences et est une solution technique bas coût. Le carbone entourant la zone à mesurer (l'eau) ne semble pas poser de problèmes particuliers, et les problèmes éventuels de dynamique pourront être surmontés par des solutions simples de filtrage.

En première approche une fréquence située dans la bande ISM à 2.45 GHz nous semble raisonnable.

### 5.5 Réponse fréquentielle du composite

Le principe de la détection de l'eau consiste à détecter une sous-harmonique. Cette sous harmonique consiste ainsi à la signature de l'eau. Néanmoins le système physique ne se limite pas à l'eau dans un tube infiniment rigide. En effet l'eau est emprisonnée dans un système mécanique complexe qui peut avoir sa propre réponse harmonique. Il convient donc de s'assurer que seule la partie fluide peut générer des sous-harmoniques.

L'étude du système vibratoire du système mécanique sec, relève de la mécanique des solides

déformable. Dans cette section il sera présenté quelques résultats théorique concernant les ondes dans les solides déformables, qui sera complété dans le chapitre expérimentation par une étude expérimentale sur une plaque d'essais en composite.

Les notations utilisées sont celles de [74], et nous travaillerons dans le cas cartésien.

### 5.5.1 Théorie élastique classique

Dans cette section nous introduisons rapidement la théorie élastique classique afin de développer la partie non-linéaire.

La théorie de l'élasticité linéaire [75, 76] (hypothèse de petites variations) est basée sur trois équations<sup>①</sup> :

- L'équation du mouvement qui exprime la seconde loi de Newton :

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + F_i = \rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

- Une équation liant la déformation élastique au déplacement :

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_i(\vec{X})}{\partial X_k} + \frac{\partial \xi_k(\vec{X})}{\partial X_i} \right) \simeq \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_i(\vec{x})}{\partial x_k} + \frac{\partial \xi_k(\vec{x})}{\partial x_i} \right) \quad (5.8)$$

- une équation constitutive appelée loi de Hooke liant contraintes internes et déformation élastique :

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \varepsilon_{lm} \quad (5.9)$$

Où :

- $\sigma_{ij}$  est le tenseur des contraintes. Ce tenseur est symétrique ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ).
- $X_k$  pour la position de la particule en coordonnées de Lagrange.
- $x_k$  pour la position de la particule en coordonnées d'Euler.
- $F_i$  sont les forces appliquées.
- $\rho$  est la densité massique.
- $\xi_i$  est la composante suivant  $i$  du vecteur déformation.
- $C_{iklm}$  est un tenseur d'ordre 4 appelé tenseur du module d'élasticité de Cauchy satisfaisant les propriétés de symétrie  $C_{iklm} = C_{kilm} = C_{ikml} = C_{lmik}$ .
- $\varepsilon_{ij}$  est le tenseur des petites déformations (symétrique  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ).

En utilisant les équations (5.8) et (5.9) dans l'équation (5.7) et en l'absence de terme source, nous obtenons l'équation des ondes élastiques :

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial \xi_l}{\partial x_m} + \frac{\partial \xi_m}{\partial x_l} \right) \quad (5.10)$$

$$= \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial^2 \xi_l}{\partial x_k \partial x_m} + \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial^2 \xi_m}{\partial x_k \partial x_l} \quad (5.11)$$

Or  $C_{iklm}$  est symétrique par rapport aux indices  $l$  et  $m$  ; le premier et le deuxième terme sont donc identiques ; soit finalement l'équation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = C_{iklm} \frac{\partial^2 \xi_m}{\partial x_k \partial x_l} \quad (5.12)$$

Cette équation est linéaire et peut donc accepter une solution de type onde plane  $u_i = u_i(\vec{x})e^{-j\omega t}$ . Ainsi une excitation harmonique donnera une réponse harmonique. Dans le cadre des faibles perturbations, il n'existe pas de possibilité de générer des sous harmoniques par des ondes élastiques.

---

<sup>①</sup>En utilisant les notations tensorielles dites d'Einstein

### 5.5.2 Réponse non-linéaire d'un solide

#### 5.5.3 Cas de l'élasticité finie

L'équation (5.8) n'est qu'une approximation de la réalité dans le cas où les déformations sont faibles. Dans le cas des grandes déformations on considère le tenseur de Green-Lagrange :

$$e_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} + \frac{\partial U_l}{\partial x_i} \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right) \quad (5.13)$$

en notant  $U_i$  la position et  $u_i$  la vitesse. Le terme croisé est maintenant source de non linéarité et dans le cas de faible déplacement peut être ignoré ramenant ainsi l'expression précédente sous la forme de l'équation (5.8).

Cependant, ce terme croisé est un deuxième ordre devant les termes linéaires. On peut donc appliquer une approche de type perturbation pour traiter le cas du régime harmonique [75].

Le tenseur des contraintes de Cauchy  $\sigma$  est défini par :

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (5.14)$$

Pour écrire ce bilan en coordonnées Lagrangiennes, on définit alors le tenseur contraintes de Boussinesq  $\pi_{ij}$  :

$$\sigma = \frac{\rho}{\rho_0} \pi F^T \quad (5.15)$$

En substituant  $Du_i/Dt = \partial^2 U_i / \partial t^2$  et l'identité d'Euler, Piola, Jacobi soit :  $\nabla \cdot [\rho/\rho_0 F^T] = \nabla \cdot (F^T / \det F) = 0$ , il vient :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = F_{jk} \frac{\partial \pi_{ik}}{\partial x_k} = \frac{\partial \pi_{ik}}{\partial X_k} \quad (5.16)$$

avec  $P_{ik}$  écrit sous la forme d'une série de Taylor (loi rhéologique empirique) :

$$\pi_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial X_l} + \frac{1}{2} M_{ijklm} \frac{\partial U_k}{\partial X_l} \frac{\partial U_m}{\partial X_n} + \frac{1}{3!} M_{ijklmnpq} \frac{\partial U_k}{\partial X_l} \frac{\partial U_m}{\partial X_n} \frac{\partial U_p}{\partial X_q} + \dots \quad (5.17)$$

$$= C_{jkmn} \frac{\partial U_m}{\partial X_n} + \pi_{ij}^* \quad (5.18)$$

Soit finalement l'équation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} - C_{iklm} \frac{\partial^2 U_m}{\partial X_k \partial X_l} = \frac{\partial \pi_{ij}^*}{\partial X_k} \quad (5.19)$$

Cette équation est composée d'une part linéaire à gauche équivalente à l'équation (5.12) et d'un terme perturbateur à droite non-linéaire. Cette équation peut être étudiée par une approche de type perturbation [75] et on peut montrer que si le matériel est excité à une fréquence  $f_0$  alors il donnera naissance à des ondes surharmoniques. De même si le matériel est excité par deux fréquences ( $f_1, f_2$ ) il donnera naissance à des ondes à des fréquences ( $n f_1 \pm m f_2, (n, m) \in \mathbb{N}^2$ ). Ce phénomène ne donne pas lieu à des sous harmoniques.

#### 5.5.4 Phénomène hystérétique

La théorie précédente ne permet pas d'expliquer certains types de phénomènes élastiques, en particulier il existe certains types de matériaux qui possèdent une mémoire, en particulier les bétons et les roches. La relation entre la contrainte et la déformation présente alors une hystérésis (voir figure 5.9).

La théorie classique développée précédemment ne permet pas de modéliser ce genre de phénomène. Néanmoins, il est possible d'utiliser des modèles phénoménologiques permettant de modéliser ce genre de matériaux. On peut alors prouver que ce genre de matériau ne produit que des super harmoniques [77].

### 5.5.5 Non linéarité au niveau des contacts

Les deux précédents effets ont été les premiers étudiés dans le cadre de l'acoustique et de l'analyse vibratoire. Cependant même pour des vibrations de forte amplitude (élongation de l'ordre de  $1 \times 10^{-4}$ ), la contribution des phénomènes précédents est de l'ordre de  $1 \times 10^{-3}$ . Ces effets ne sont pas négligeables dans le cas où l'onde acoustique se propage sur de longue distance dans le matériel (effet de conversion accumulative). De ce point de vue les matériaux classique exhibe une non-linéarité de type *distribuée* [78].

Il a été cependant observé qu'une réponse non linéaire de forte amplitude peut exister au niveau de certain type de fracture dans un matériel [40, 79–81], due à une non linéarité de contact. En effet un niveau de la fracture, l'élasticité en compression est beaucoup plus élevée que l'élasticité en tension. La génération d'harmoniques est alors très importante. Plus surprenant, il est possible que cette fracture crée des sous-harmoniques [78, 82–84]. Ce phénomène de sous-harmoniques est aussi observé dans les matériaux granulaires [85].

Cette méthode de détection par sous harmoniques a déjà été utilisé avec succès pour la détection de fracture fermée dans divers matériaux [86–89].

Néanmoins il convient de noter que cette génération de sous harmonique correspond en premier lieu à des configuration de matériaux difficiles à obtenir, et qu'en second lieu cette sous harmonique correspond à un matériau au caractéristiques mécaniques altérées.

Ce type de non linéarités est à rapprocher du contact Hertzien [75], c'est-à-dire le contact dans notre cas entre le vibreur et la pièce à inspecter. Ce contact peut générer assez facilement des sous harmoniques mais une simple précontrainte mécanique, évite de manière simples ce problème. La précontrainte mécanique peut être constitué d'une masse ou en spécifiant l'opérateur comme dans le cas des sondes à ultrason d'appuyer lors de l'inspection. Ce type de biais de mesure peut être en plus détecté à priori en utilisant un laser sur le bord du vibreur permettant de mesurer le mouvement du vibreur par rapport à la pièce à inspecter. Ces capteurs peuvent être réalisé à partir d'une simple diode LASER (capteur de type self-mixing) et donc être très économiques.

### 5.5.6 Conclusion

Les différents type de phénomènes mécaniques vibratoire au niveau du carbone :

- Ne génèrent pas des sous-harmoniques mais uniquement des super-harmoniques.
- Correspondent à des matériaux déjà abimés et qui seront peu rencontrés en pratique.

Les sous-harmoniques constituent donc une signature du liquide enfermé dans la structure. Un resumé graphique des différents phénomènes peut être trouvé sur la figure 5.9.

Le cas du contact hertzien, en théorie plus gênant, peut être facilement résolu en pratique et même détecté à priori.

Ces résultats théoriques ont été confirmés par expérimentation sur une plaque de carbone saine (voir la section 7.3 page 125).

## 5.6 Le dispositif d'étude

Le dispositif d'étude complet est composé d'une chaîne mécanique assurant la vibration de la plaque de composite, qui elle même peut être décomposée en une chaîne de puissance fournissant la puissance électrique à un actionneur mécanique. De l'autre côté la chaîne de détection est composée d'un radar et de son amplificateur faible bruit, et pour l'affichage d'un oscilloscope ou un PC.

Ce dispositif d'étude fournit ainsi un ensemble de type maquette de laboratoire apte à tester le concept de détection et à fournir des résultats expérimentaux. Il est bien entendu très rudimentaire n'ayant pas vocation à être industrialisé.



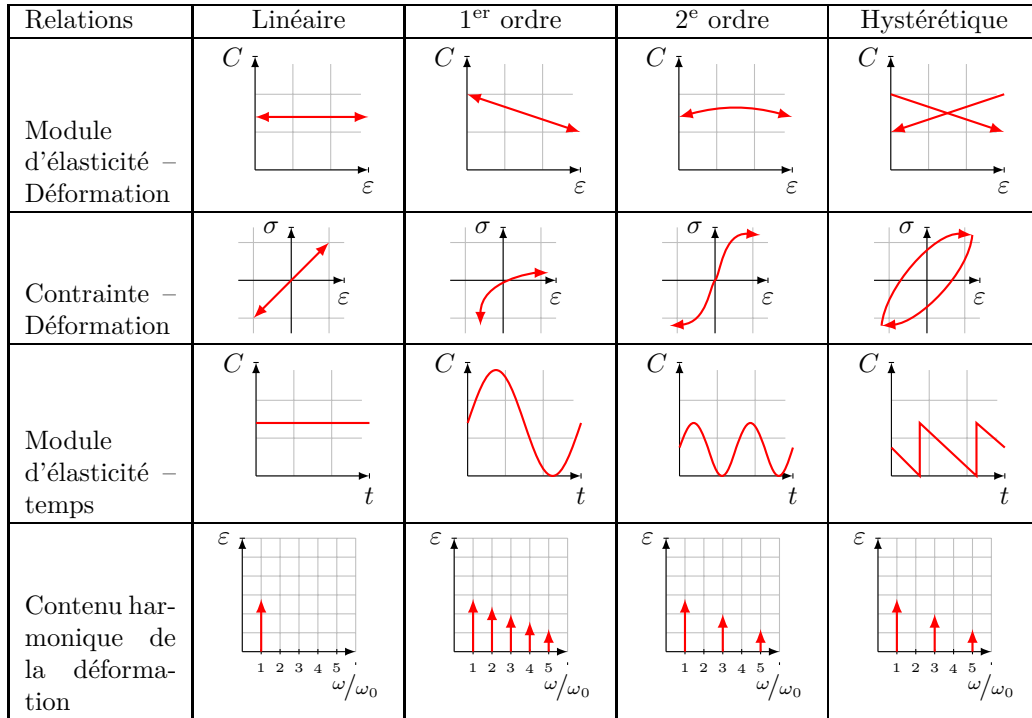


FIG. 5.9: Différent cas de non linéarité mécanique pour un forçage monofréquentiel de pulsation  $\omega_0$  (adapté de [90])

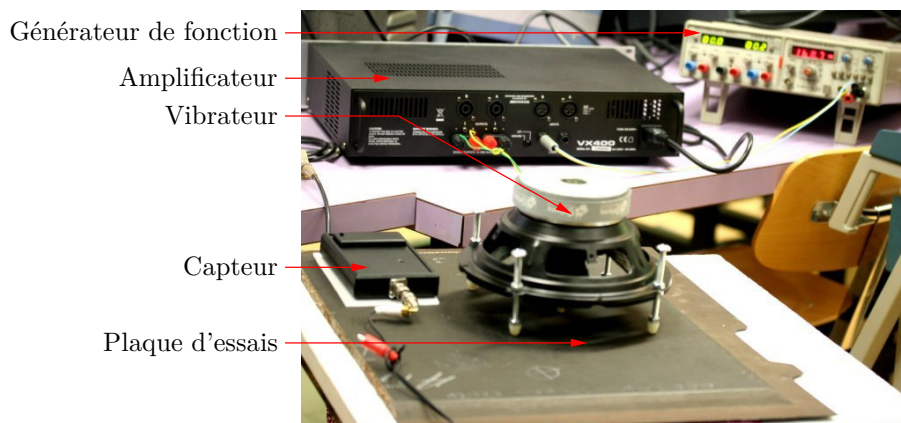


FIG. 5.10: Photographie du dispositif d'étude

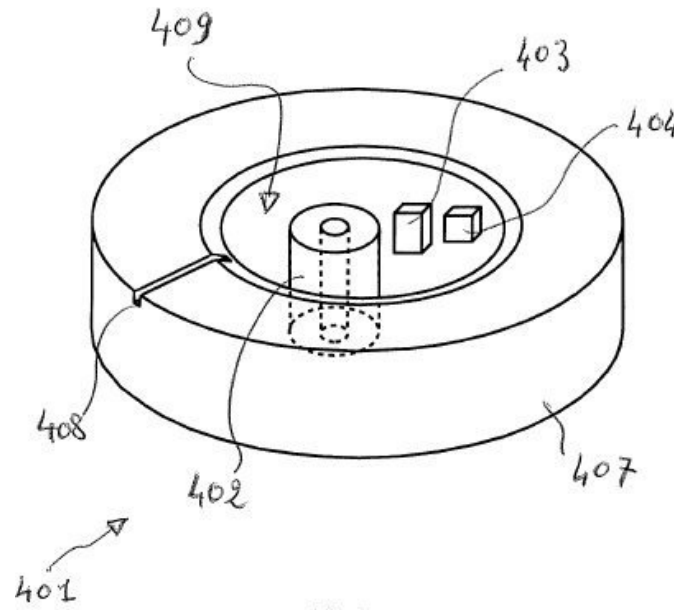


FIG. 5.11: Esquisse d'un dispositif intégré [7]. Un anneau piézoélectrique (407) met en vibration mécanique la structure. L'intérieur (409) est creux et contient le radar (402), et son électronique (403–404).

## 5.7 Perspectives

### 5.7.1 Électronique

À l'heure actuelle, le traitement du signal de notre dispositif est quasiment inexistant mis à part une FFT ou une cross corrélation du signal. Le point traitement du signal est donc amplement améliorable. En particulier, il est conveniendra de tester plusieurs type de transformés temps/fréquences. Il conveniendra aussi de mettre au point un système expert apte à détecter de manière automatique la présence d'eau et pourquoi pas imager sous forme de cartes 2D le composite en mettant en valeur les positions contenant de l'eau (à l'aide d'un balayage  $xy$  par exemple).

Il est aussi possible d'augmenter la sensibilité du RADAR en diminuant le bruit de scintillation au niveau de la partie RF, bruit étant dominant pour les fréquences d'intérêt inférieures à 1 kHz. Au niveau de la partie RF, il suffit pour cela de diminuer ou d'éliminer la composante DC lors du mixage. En effet, le bruit de scintillation est directement proportionnel au courant DC traversant les composants non linéaires. Plusieurs topologies ont été mise au point et permettent en pratique cette élimination, permettant ainsi de gagner de l'ordre de 9 dB au niveau du rapport signal à bruit [91–93].

### 5.7.2 Mécanique

En l'état actuel l'outil expérimental n'est absolument pas intégré, la partie mécanique étant complètement découplée de la partie traitement du signal. Il semble possible d'intégrer les deux aspects dans un seul dispositif de genre coaxial, le capteur RADAR se situant au centre du dispositif mécanique (cf figure 5.11). Ce capteur se présentant sous la forme d'un cylindre aisément manipulable par l'opérateur, aurait en outre l'intérêt de fournir l'excitation mécanique au plus près de la mesure électromagnétique. En pratique, la source de vibration pourrait être réalisé à l'aide de la technologie piézoélectrique.

## 5.8 Conclusion

Une méthode de détection de l'eau libre dans les composites carbonés a été présentée. Ce dispositif innovant a fait l'objet d'un brevet international [7, 94]. À notre connaissance, ce brevet est la première publication utilisant à des fins de contrôle non destructif les ondes de Faraday<sup>①</sup>

Cette approche est basée sur une technique de type multiphysique associant une excitation vibratoire, avec une mesure radar, permettant ainsi d'extraire de manière relativement aisée le signal utile du bruit.

Le chapitre suivant présentera la théorie des ondes de Faraday en particulier dans les réservoirs dans lesquels la capillarité est non négligeable, comme dans notre cas de réservoir de type composite.

## 5.9 Bibliographie

- [1] Egawa HIROTSUGU. "Method and device for inspecting water droplet in bonded honeycomb structure". langjapanese. patentjp 5188041. MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES LTD. 27 juil. 1993. Cf. p. 70, 73.
- [2] Fernando Manuel FERREIRA DOS SANTOS, Jean Louis MIANE et Jean Louis ARNAUD. « Système de détection, de quantification et/ou localisation d'eau dans des structures sandwich d'aéronef et procédés de mise en œuvre de ce système ». Français. Demande de brev. française 2880424. 30 déc. 2004. Cf. p. 70, 86.
- [3] Fernando Manuel FERREIRA DOS SANTOS, Jean Louis MIANE et Jean Louis ARNAUD. « Système de détection, de quantification et/ou localisation d'eau dans des structure sandwich d'aéronef et procédés de mise en œuvre de ce système ». Français. Demande de brev. européenne 1834171. Priorité : [2]. 13 juil. 2006. Cf. p. 70.
- [4] Seichi OKAMURA. « Interface detection apparatus and method for detecting hidden interface using microwave ». Anglais. Demande de brev. américaine 2005156607. 21 juil. 2005. Cf. p. 70.
- [5] Fernando Manuel FERREIRA DOS SANTOS et Jean Louis ARNAUD. « Système de détection, d'eau dans une structures sandwich d'aéronef ». Français. Demande de brev. française 2893135. 10 nov. 2005. Cf. p. 70.
- [6] Gabriel LAPLANTE et al. « Detection of water ingress in composite sandwich structures : a magnetic resonance approach ». Anglais. Dans : *NDT & E International* 38.6 (sept. 2005), p. 501–507. ISSN : 0963-8695. DOI : 10.1016/j.ndteint.2005.01.006. Cf. p. 70.
- [7] Bastien ROUCARIÈS et al. « Procédé et dispositif de détection d'eau dans les structures alvéolaires ». Français. Brev. français FR2917166. 5 juin 2007. Cf. p. 71, 85, 86.
- [8] Michel FARADAY. « On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surface ». Anglais. Dans : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 121 (mai 1831), p. 299–340. DOI : 10.1098/rstl.1831.0018. Cf. p. 71.
- [9] Doug BINKS et Willem VAN DE WATER. « Nonlinear Pattern Formation of Faraday Waves ». Dans : *Physical Review Letters* 78.21 (1997), p. 4043–4046. ISSN : 0031-9007. DOI : 10.1103/PhysRevLett.78.4043. Cf. p. 72.
- [10] Dipen N. SINHA. « Noninvasive identification of fluids by swept-frequency acoustic interferometry ». Anglais. Brev. américain 5767407. THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA. 16 juin 1998. Cf. p. 73.
- [11] William TUCKER. « Radio object detection alarm ». Anglais. Brev. américain 2545503. SECRETARY OF WAR, UNITED STATES OF AMERICA. 20 mar. 1951. Cf. p. 73.

---

<sup>①</sup>Le brevet fut d'ailleurs directement validé par l'office des brevets, qui nota dans son rapport de recherche l'absence de méthode de contrôle non destructif basée sur les ondes de Faraday.

- [12] Jerome MACHLIS et George L. HATCHETT. « F.M. Radar scoring system ». Anglais. Brev. américain 3012242. NORTHROP CORPORATION. 5 déc. 1961. Cf. p. 73.
- [13] Vladimir V. KLJUEV et al. « Device for measurement of vibrations ». Anglais. Brev. américain 4481825. NAUCHNO-ISSLEDOVATELSKY, INSTITUT INTROSKOPII. 13 nov. 1984. Cf. p. 73.
- [14] Thomas George THORNE et Louise Ireland RUFFE. « Radar doppler intruder detector ». Anglais. patentgb 2092853. RACAL-MESL LIMITED. 18 août 1982. Cf. p. 73.
- [15] V. C. CHEN et al. « Analysis of micro-Doppler signatures ». Anglais. Dans : *IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation* 150.4 (août 2003), p. 271–276. ISSN : 1350-2395. DOI : 10.1049/ip-rsn:20030743. Cf. p. 73.
- [16] V. C. CHEN et al. « Micro-Doppler effect in radar : phenomenon, model, and simulation study ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 42.1 (jan. 2006), p. 2–21. ISSN : 0018-9251. DOI : 10.1109/TAES.2006.1603402. Cf. p. 73, 74.
- [17] Fenton M. WOOD et Noel B. PROCTOR. « Ultrasonic inspection system using doppler shift ». Anglais. Brev. américain 3321959. AMERICA MACHINE AND FOUNDRY COMPANY. 30 mai 1967. Cf. p. 74.
- [18] Donald R. WELLS. « Tire inspection apparatus and method ». Anglais. Brev. américain 3919882. 18 nov. 1975. Cf. p. 74.
- [19] Jack THIESEN et Philips O'BRIEN. « Doppler radar for detecting tire abnormalities ». Anglais. Brev. américain 7082819. MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A. 1<sup>er</sup> août 2006. Cf. p. 74.
- [20] Thomas E. MCEWAN. « Radar monitoring system for tires and wheels ». Anglais. Demande de brev. américaine 2004168512. 2 sept. 2004. Cf. p. 74.
- [21] Thomas E. MCEWAN. « Magneto-radar detector and method ». Anglais. Brev. américain 6914552. THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA. 5 juil. 2005. Cf. p. 74.
- [22] Dimitri M. DONSKOY et Alexander M. SUTIN. « Method and apparatus for acoustic detection of mines and other buried man-made objects ». Anglais. Brev. américain 6415666. THE TRUSTEES OF THE STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 9 juil. 2002. Cf. p. 74, 87.
- [23] Dimitri M. DONSKOY et Alexander M. SUTIN. « Method and apparatus for acoustic detection of mines and other buried man-made objects ». Anglais. Brev. américain 6134966. THE TRUSTEES OF THE STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 24 oct. 2000. Cf. p. 74, 87.
- [24] Dimitri M. DONSKOY et Alexander M. SUTIN. « Method and apparatus for acoustic detection of mines and other buried man-made objects ». Anglais. Brev. européen 995129. THE TRUSTEES OF THE STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Priorité : [22, 23, 48]. 29 avr. 2000. Cf. p. 74.
- [25] Dimitri DONSKOY, Nicolay SEDUNOV et Edward A. WHITTAKER. « Method and apparatus for remote measurement of vibration and properties of objects ». Anglais. Brev. américain 7073384. THE TRUSTEES OF THE STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 11 juil. 2006. Cf. p. 74.
- [26] William STEINWAY et Waymond SCOTT. « Mine detection using radar vibrometer ». Brev. américain 7082819. L-3 COMMUNICATIONS CYTERRA CORPORATION. 19 sept. 2006. Cf. p. 74.
- [27] William STEINWAY et Waymond SCOTT. « Mine detection using radar vibrometer ». Brev. américain 7082819. L-3 COMMUNICATIONS CYTERRA CORPORATION. 27 fév. 2007. Cf. p. 74.
- [28] Seung-Ho LEE. « Measurement of Time-Varying Surface Displacement using a RADAR ». Anglais. Thèse de doct. Atlanta, GA, USA : Georgia Institute of Technology, 2002. Cf. p. 74.

- [29] Christoph T. SCHRÖDER. « On the Interaction of Elastic Waves with Buried Land Mines : an Investigation Using the Finite-Difference Time-Domain Method ». Anglais. Thèse de doct. Atlanta, GA, USA : Georgia Institute of Technology, 2001. Cf. p. 74.
- [30] Waymond R. SCOTT, JR, Christoph SCHROEDER et James S. MARTIN. « An acousto-electromagnetic sensor for locating land mines ». Anglais. Dans : *AeroSense, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III*. T. 3392. Orlando, FL, USA : SPIE, 1998, p. 176–186. ISBN : 0-819-42841-8. DOI : 10.1117/12.324189. Cf. p. 74.
- [31] Waymond R. SCOTT, JR et James S. MARTIN. « Experimental investigation of the acousto-electromagnetic sensor for locating land mines ». Anglais. Dans : *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV*. T. 3710. Orlando, FL, USA : SPIE, 1999, p. 204–214. ISBN : 0-819-43184-2. DOI : 10.1117/12.357041. Cf. p. 74.
- [32] Waymond R. SCOTT, JR, Gregg D. LARSON et James S. MARTIN. « Simultaneous use of elastic and electromagnetic waves for the detection of buried land mines ». Anglais. Dans : *AeroSense, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*. T. 4038. Orlando, FL, USA : SPIE, 2000, p. 667–678. ISBN : 0-819-43664-X. DOI : 10.1117/12.396295. Cf. p. 74.
- [33] W. R. SCOTT, JR et al. « Use of elastic waves for the detection of buried land mines ». Anglais. Dans : *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01*. T. 3. Sydney, NSW, Australia 2001, p. 1116–1118. DOI : 10.1109/IGARSS.2001.976764. Cf. p. 74.
- [34] Waymond R. SCOTT, JR, James S. MARTIN et Gregg D. LARSON. « Audible and visual representations of the signals from a seismic landmine detection system ». Anglais. Dans : *Journal of the Acoustical Society of America* 112 (nov. 2002), p. 2325–2325. ISSN : 0001-4966. Cf. p. 74.
- [35] A. BEHBOODIAN et al. « Signal processing of elastic surface waves for localizing buried land mines ». Anglais. Dans : *Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. T. 2. Pacific Grove, CA, USA 1999, p. 827–830. DOI : 10.1109/ACSSC.1999.831825. Cf. p. 74.
- [36] William H. HULSMAN. « Food container internal pressure analysis ». Anglais. Brev. américain 5869747. William H. HULSMAN. 9 fév. 1999. Cf. p. 74, 88.
- [37] William H. HULSMAN. « Food container internal pressure analysis ». Anglais. Brev. européen 900366. Benthos INC. Priorité : [36]. 10 mar. 1999. Cf. p. 74.
- [38] Josef FEHRENBACH, Jurgen MOTZER et Karl GRIESSBAUM. « System for manufacturing a modularly structured apparatus for determining a physical process quantity, and standardized components ». Anglais. Demande de brev. américaine 2004183550. 23 sept. 2004. Cf. p. 75, 88.
- [39] Josef FEHRENBACH, Jurgen MOTZER et Karl GRIESSBAUM. « System for manufacturing a modularly structured apparatus for determining a physical process quantity, and standardized components ». Anglais. Demande de brev. européenne EP1529198. Priorité : [38]. 11 mai 2005. Cf. p. 75.
- [40] O. BUCK, W. L. MORRIS et J. M. RICHARDSON. « Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks ». Anglais. Dans : *Applied Physics Letters* 33 (sept. 1978), p. 371–373. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.90399. Cf. p. 75, 83.
- [41] W. L. MORRIS, O. BUCK et R. V. INMAN. « Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks ». Anglais. Dans : *Journal of applied physics* 50.11 (nov. 1979), p. 6737–6741. ISSN : 0021-8979. DOI : 10.1063/1.325917. Cf. p. 75.
- [42] S. BIWA, S. NAKAJIMA et N. OHNO. « On the Acoustic Nonlinearity of Solid-Solid Contact With Pressure-Dependent Interface Stiffness ». Anglais. Dans : *Journal of applied mechanics* 71.4 (juil. 2004), p. 508. ISSN : 0021-8936. DOI : 10.1115/1.1767169. Cf. p. 75.

- [43] K. E. A. Van Den ABEELE et al. « Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) ». Anglais. Dans : *NDT & E International* 34.4 (juin 2001), p. 239–248. ISSN : 0963-8695. DOI : 10.1016/S0963-8695(00)00064-5. Cf. p. 75.
- [44] Vladimir ZAITSEV et al. « Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection ». Anglais. Dans : *NDT & E International* 39.3 (avr. 2006), p. 184–194. ISSN : 0963-8695. DOI : 10.1016/j.ndteint.2005.07.007. Cf. p. 75.
- [45] Ping WU et Erik WENNERSTRÖM. *Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound. Phased arrays, ultrasonic imaging and nonlinear acoustics*. Anglais. Rap. tech. TR-04-24. Stockholm, Sweden : Svensk Kärnbränslehantering AB, 2004. URL : <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-04-24webb.pdf>. Cf. p. 75.
- [46] Yongping ZHENG, Roman Gr. MAEV et Igor Yu. SOLODOV. « Nonlinear acoustic applications for material characterization : A review ». Dans : *Canadian Journal of Physics* 77.12 (déc. 1999), p. 927–967. ISSN : 1208-6045. Cf. p. 75.
- [47] Leif BJØRNØ. « Forty years of nonlinear ultrasound ». Anglais. Dans : *Ultrasonics* 40.1-8 (mai 2002), p. 11–17. ISSN : Ultrasonics. DOI : 10.1016/S0041-624X(02)00084-7. Cf. p. 75.
- [48] Dimitri M. DONSKOY et Alexander M. SUTIN. « Method and apparatus for acoustic detection of mines and other buried man-made objects ». Anglais. Brev. américain 5974881. THE TRUSTEES OF THE STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 2 nov. 1999. Cf. p. 75, 87.
- [49] Vyacheslav V. KAZAKOV, Alexander SUTIN et Paul A. JOHNSON. « Sensitive imaging of an elastic nonlinear wave-scattering source in a solid ». Dans : *Applied Physics Letters* 81 (2002), p. 646. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.1495081. Cf. p. 75.
- [50] Alexei MOUSSATOV, Bernard CASTAGNÈDE et Vitalyi GUSEV. « Frequency up-conversion and frequency down-conversion of acoustic waves in damaged materials ». Anglais. Dans : *Physics Letters A* 301.3-4 (août 2002), p. 281–290. ISSN : 0375-9601. DOI : 10.1016/S0375-9601(02)00974-X. Cf. p. 75.
- [51] D. DONSKOY, A. SUTIN et A. EKIMOV. « Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing ». Anglais. Dans : *NDT & E International* 34.4 (juin 2001), p. 231–238. ISSN : 0963-8695. DOI : 10.1016/S0963-8695(00)00063-3. Cf. p. 75.
- [52] Ping WU. « Nonlinear interaction of ultrasound with an unbounded rough interface ». Anglais. Dans : *2005 IEEE Ultrasonics Symposium*. T. 1. Rotterdam, Holland : IEEE, 2005, p. 289–292. ISBN : 0-7803-9382-1. Cf. p. 75.
- [53] Bernhard HEUFT et Hans-Ulrich GOLLER. « Verfahren zur Bestimmung von Parametern, z. B. Füllstand, Druck, Gaszusammensetzung in verschlossenen Behältern ». Allemand. Brev. allemand 19646685. HEUF SYSTEMTECHNIK GMBH. 14 mai 1998. Cf. p. 75, 89.
- [54] Bernhard HEUFT et Hans-Ulrich GOLLER. « Method for determining parameters, for example level, pressure, gas composition in closed containers ». Anglais. Brev. européen 938653. HEUF SYSTEMTECHNIK GMBH. Priorité : [53]. 1<sup>er</sup> sept. 1999. Cf. p. 75.
- [55] Bernhard HEUFT et Hans-Ulrich GOLLER. « Method for determining parameters, for example level, pressure, gas composition in closed containers ». Anglais. Brev. américain 6338272. Heuft Systemtechnik GMBH. Priorité : [53]. 15 jan. 2002. Cf. p. 75.
- [56] Mike GOLIO, éd. *Microwave and RF Product Applications*. Anglais. Boca Raton : CRC Press, 2001. ISBN : 0-8493-1732-0. Cf. p. 76.
- [57] P. David FISHER. « Improving on police radar ». Anglais. Dans : *IEEE Spectrum Magazine* 29.7 (juil. 1992), p. 38–43. ISSN : 0018-9235. DOI : 10.1109/6.144510. Cf. p. 76.
- [58] O. Boric LUBECKE, P.-W. ONG et V. M. LUBECKE. « 10 GHz Doppler radar sensing of respiration and heart movement ». Dans : *Proceedings of the IEEE 28th Annual Northeast Bioengineering Conference*. Philadelphia, PA, USA 2002, p. 55–56. ISBN : 0-7803-7419-3. DOI : 10.1109/NEBC.2002.999462. Cf. p. 78.

- [59] Noah HAFNER et al. « Non-Contact Cardiopulmonary Sensing with a Baby Monitor ». Anglais. Dans : *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*. FrP1C4.2. Lyon, France : IEEE, 2007, p. 2300–2302. ISBN : 978-1-4244-0787-3. DOI : 10.1109/IEMBS.2007.4352785. Cf. p. 78.
- [60] Carl DURNEY, Douglas CHRISTENSEN et Cynthia FURSE. *Basic Introduction to Bioelectromagnetics*. Anglais. 2<sup>e</sup> éd. Boca Raton : CRC Press, 2009. ISBN : 978-1-4200-5542-9. Cf. p. 78.
- [61] James C. LIN. « Noninvasive microwave measurement of respiration ». Anglais. Dans : *Proceedings of the IEEE* 63.10 (oct. 1975), p. 1530. ISSN : 0018-9219. Cf. p. 78.
- [62] James C. LIN et al. « Microwave Apexcardiography ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 27.6 (juin 1979), p. 618–620. ISSN : 0018-9480. Cf. p. 78.
- [63] Kun-Mu CHEN et al. « An X-Band Microwave Life-Detection System ». Dans : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 33.7 (juil. 1986), p. 697–701. ISSN : 0018-9294. DOI : 10.1109/TBME.1986.325760. Cf. p. 78.
- [64] Huey-Ru CHUANG, Y. F. CHEN et Kun-Mu CHEN. « Automatic clutter-canceler for microwave life-detection systems ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 40.4 (août 1991), p. 747–750. ISSN : 0018-9456. DOI : 10.1109/19.85346. Cf. p. 78.
- [65] Kun-Mu CHEN et al. « Microwave life-detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 47 (jan. 2000), p. 105–114. ISSN : 0018-9294. DOI : 10.1109/10.817625. Cf. p. 78.
- [66] Lawrence M. FRAZIER. « Handheld obstacle penetrating motion detecting radar ». Anglais. Brev. américain 5345240. HUGHES MISSILE SYSTEMS COMPANY. 6 sept. 1994. Cf. p. 78, 90.
- [67] Lawrence M. FRAZIER. « Handheld obstacle penetrating motion detecting radar ». Anglais. Brev. européen 638820. HUGHES AIRCRAFT CO. Priorité : [66]. 10 fév. 1999. Cf. p. 78.
- [68] Lawrence M. FRAZIER. « Concrete penetrating imaging radar ». Anglais. Brev. américain 5446461. HUGHES MISSILE SYSTEMS COMPANY. 29 août 1995. Cf. p. 78.
- [69] Donna MILES. *New Device Will Sense Through Concrete Walls*. 2006. URL : <http://www.defenselink.mil/news/newsarticle.aspx?id=14711> (visité le 01/07/2009). Cf. p. 78, 79.
- [70] KAI SENSORS. *Kai Sensors Secures U.S. Army Funding for Radar on a Chip*. 2007. URL : <http://www.marketwire.com/press-release/Kai-Sensors-Inc-780976.html> (visité le 01/07/2009). Cf. p. 78.
- [71] Fred E. NATHANSON, JP REILLY et M.N. COHEN. *Radar design principles. signal processing and the environment*. New York : McGraw Hill, 1999. Cf. p. 79.
- [72] Christos CHRISTOPOULOS. *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*. Anglais. 2<sup>e</sup> éd. Boca Raton : CRC Press, 2007. ISBN : 978-0-8493-7035-9. Cf. p. 79.
- [73] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Mie Theory*. 2009. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mie\\_theory](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mie_theory) (visité le 01/07/2009). Cf. p. 79, 80.
- [74] Jean SALENÇON. « Concepts généraux ». Dans : *Mécanique des milieux continus*. 2<sup>e</sup> éd. T. 1. Palaiseau, France : Édition de l'École Polytechnique, 2005. Cf. p. 81.
- [75] L. LANDAU et E. LIFCHITZ. « Théorie de l'élasticité ». Dans : *Physique théorique*. 2<sup>e</sup> éd. T. 7. Moscou, URSS : MIR, 1990. ISBN : 5-03-000645-1. Cf. p. 81–83.
- [76] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Linear elasticity*. 2008. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Linear\\_elasticity](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Linear_elasticity) (visité le 04/06/2008). Cf. p. 81.

- [77] Mourad BENTAHAR. « Acoustique non-linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogènes et à la prédiction de la durée de vie ». Français. Thèse de doct. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées, 2005. Cf. p. 82.
- [78] B. A. KORSHAK, I. Yu SOLODOV et E. M. BALLAD. « DC effects, sub-harmonics, stochasticity and “memory” for contact acoustic non-linearity ». Anglais. Dans : *Ultrasonics* 40.1-8 (2002), p. 707–713. ISSN : 0041-624X. DOI : 10.1016/S0041-624X(02)00241-X. Cf. p. 83.
- [79] I. Yu. SOLODOV. « Nonlinear NDE using contact acoustic nonlinearity (CAN) ». Dans : *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*. T. 2. Cannes, France : IEEE, 1994, p. 1279–1283. ISBN : 0-7803-2012-3. DOI : 10.1109/ULTSYM.1994.401817. Cf. p. 83.
- [80] Igor Yu. SOLODOV. « Ultrasonics of non-linear contacts : propagation, reflection and NDE-applications ». Anglais. Dans : *Ultrasonics* 36.1 (1998), p. 383–390. ISSN : 0041-624X. DOI : 10.1016/S0041-624X(97)00041-3. Cf. p. 83.
- [81] Wen Qiu WU et al. « Investigation of contact acoustic nonlinearity at solid interface ». Anglais. Dans : *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*. T. 2. Sendai, Japan : IEEE, 1998, p. 1175–1178. ISBN : 0-7803-4095-7. DOI : 10.1109/ULTSYM.1998.765048. Cf. p. 83.
- [82] Igor Yu. SOLODOV et Boris A. KORSHAK. « Instability, Chaos, and “Memory” in Acoustic-Wave–Crack Interaction ». Anglais. Dans : *Physical Review Letters* 88.1 (déc. 2001), p. 014303. ISSN : 0031-9007. DOI : 10.1103/PhysRevLett.88.014303. Cf. p. 83.
- [83] I. Yu. SOLODOV, N. KROHN et G. BUSSE. « CAN : an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids ». Anglais. Dans : *Ultrasonics* 40.1-8 (mai 2002), p. 621–625. ISSN : 0041-624X. DOI : 10.1016/S0041-624X(02)00186-5. Cf. p. 83.
- [84] Alexei MOUSSATOV, Vitalyi GUSEV et Bernard CASTAGNÈDE. « Self-Induced Hysteresis for Nonlinear Acoustic Waves in Cracked Materi ». Anglais. Dans : *Physical Review Letters* 90.12 (mar. 2003), p. 124301. ISSN : 0031-9007. DOI : 10.1103/PhysRevLett.90.124301. Cf. p. 83.
- [85] V. TOURNAT, V. E. GUSEV et B. CASTAGNÈDE. « Subharmonics and noise excitation in transmission of acoustic wave through unconsolidated granular medim ». Anglais. Dans : *Physics Letters A* 326.5-6 (2004), p. 340–348. ISSN : 0375-9601. DOI : 10.1016/j.physleta.2004.04.042. Cf. p. 83.
- [86] I. SOLODOV et al. « Nonlinear Ultrasonic Inspection and NDE using Subharmonic and Self-Modulation Modes ». Dans : *World Congress on Ultrasonics 2003*. Paris, France : Société Française d’acoustique, 2003, p. 1335–1338. ISBN : 2-9521105-0-6. Cf. p. 83.
- [87] Kazushi YAMANAKA, Tsuyoshi MIHARA et Toshihiro TSUJI. « Evaluation of closed cracks by analysis of subharmonic ultrasound with closure stress ». Anglais. Dans : *World Conference on NDT*. Montreal, Canada : NDT.net, 2004. Cf. p. 83.
- [88] I. SOLODOV et al. « Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location ». Anglais. Dans : *Applied Physics Letters* 84 (juin 2004), p. 5386. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.1767283. Cf. p. 83.
- [89] Yoshikazu OHARA et al. « Imaging of closed cracks using nonlinear response of elastic waves at subharmonic frequency ». Dans : *Applied Physics Letters* 90 (2007), p. 011902. ISSN : 0003-6951. DOI : 10.1063/1.2426891. Cf. p. 83.
- [90] K. E.-A. Van Den ABEELE, P. A. JOHNSON et A. SUTIN. « Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I : Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS) ». Anglais. Dans : *Research in Nondestructive Evaluation* 12.1 (sept. 2000), p. 17–30. ISSN : 0934-9847. DOI : 10.0007/s001640000002. Cf. p. 84.



- [91] Choul-Young KIM et al. « Tx Leakage Cancellers for 24 GHz and 77 GHz Vehicular Radar Applications ». Anglais. Dans : *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. San Francisco, USA : IEEE, 2006, p. 1402–1405. DOI : 10.1109/MWSYM.2006.249531. Cf. p. 85.
- [92] Dung NGUYEN et al. « Noise Considerations for Remote Detection of Life Signs with Microwave Doppler Radar ». Anglais. Dans : *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*. FrA05.7. Lyon, France : IEEE, 2007, p. 1667–1670. ISBN : 978-1-4244-0787-3. DOI : 10.1109/IEMBS.2007.4352628. Cf. p. 85.
- [93] Choul-Young KIM, Jeong-Geun KIM et Songcheol HONG. « A Quadrature Radar Topology With Tx Leakage Canceller for 24-GHz Radar Applications ». Anglais. Dans : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 55.7 (juil. 2007), p. 1438–1444. ISSN : 0018-9480. DOI : 10.1109/TMTT.2007.900316. Cf. p. 85.
- [94] Bastien ROUCARIÈS et al. « Method and device for detecting water in a cellular structure ». patentwo 2008148740. Institut National Polytechnique de TOULOUSE. 2008. Cf. p. 86.
- [95] Anglais. Lyon, France : IEEE, 2007. ISBN : 978-1-4244-0787-3.

## Chapitre 6

# Instabilités paramétriques d'un matériau diphasique

### Table des matières

6.1	Introduction . . . . .	93
6.2	Vibration d'un réservoir : cas linéaire . . . . .	94
6.2.1	Introduction . . . . .	94
6.2.2	Modèle simplifié . . . . .	94
6.2.2.1	Le problème de Laplace . . . . .	94
6.2.2.2	Application à un cylindre . . . . .	96
6.2.2.3	Calcul des pertes . . . . .	97
6.2.2.4	Les limites . . . . .	99
6.2.3	Le modèle de KIDAMBI . . . . .	99
6.2.3.1	Le modèle physique . . . . .	99
6.2.3.2	Application à notre cas d'étude . . . . .	104
6.2.3.3	Conditions aux limites de type glissante . . . . .	104
6.2.3.4	Conclusion et perspectives . . . . .	106
6.3	Excitation paramétrique d'un fluide : les ondes de Faraday . . . . .	107
6.3.1	Introduction . . . . .	107
6.3.2	L'équation de Mathieu . . . . .	108
6.3.3	Étude au premier ordre . . . . .	108
6.3.3.1	Étude de l'équation de Mathieu classique . . . . .	108
6.3.3.2	Étude de l'influence de la dissipation . . . . .	110
6.3.4	Utilisation du modèle linéaire . . . . .	115
6.3.5	Vers un modèle plus complet . . . . .	116
6.4	Cas d'un réservoir entièrement rempli de fluide . . . . .	116
6.5	Simulation . . . . .	117
6.5.1	Simulation complète avec star-ccm+ . . . . .	118
6.5.2	Conclusion et perspectives . . . . .	118
6.6	Conclusion . . . . .	119
6.7	Bibliographie . . . . .	119

### 6.1 Introduction

Les ondes de Faraday sont des ondes non linéaires qui apparaissent à la surface d'un liquide soumis à une vibration verticale. Elles ont été pour la première fois décrites dans un article de FARADAY [1], et ont été plus amplement étudiées par Lord RAYLEIGH [2, 3]. Lord RAYLEIGH

remarqua en outre que soumettre un fluide à une vibration mécanique, est équivalent à moduler la gravité<sup>①</sup> [2].

La première modélisation du phénomène fut réalisée par BENJAMIN et URSELL dans [4], sous l'hypothèse d'un flux irrotationnel (négligeant la dissipation). Les deux auteurs déterminèrent que sous cette hypothèse la perturbation de surface libre peut être modélisée par une équation de Mathieu, expliquant ainsi un siècle après la première expérimentation l'existence de sous harmoniques.

A notre connaissance, il n'existe qu'une seule famille de brevets concernant les ondes de Faraday [5, 6]. Ces deux brevets décrivent une méthode permettant de déplacer des petits objets à la surface d'un liquide à l'aide d'un motifs d'ondes stationnaires de type Faraday. Les auteurs de ces deux brevets, utilisent en fait un forçage à deux fréquences afin de changer à leur guise le motif d'onde stationnaire. Ce brevet dérive directement des travaux [7].

## 6.2 Vibration d'un réservoir : cas linéaire

### 6.2.1 Introduction

Le cas linéaire c'est-à-dire le cas des ondes de surface dont la fréquence de vibration est égale à la fréquence de forçage n'est pas, bien évidemment, un cas d'onde de Faraday. Néanmoins il est utile car il permet de calculer les fréquences de résonance du fluide et ainsi approcher les fréquences de résonance des ondes de Faraday.

### 6.2.2 Modèle simplifié

#### 6.2.2.1 Le problème de Laplace

Soit  $(O', X', Y', Z')$  un repère cartésien stationnaire<sup>②</sup> (un schéma explicitant les notations est donné par la figure 6.1). Les équations d'Euler du mouvement du fluide parfait, c'est-à-dire un fluide incompressible non visqueux peuvent s'écrire dans leur forme vectorielle :

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{q} + (\vec{q} \cdot \vec{\nabla}) \vec{q} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \vec{\nabla}(gZ') \quad (6.1)$$

où  $\vec{q}$  est la vitesse des particules fluides,  $\partial \vec{q} / \partial t$  est l'accélération locale des particules fluides observé à partir du référentiel stationnaire. Le terme  $(\vec{q} \cdot \vec{\nabla}) \vec{q}$  représente l'accélération convective du fluide,  $\rho$  la masse volumique,  $P$  la pression du fluide,  $\vec{\nabla}(gZ')$  le potentiel de gravité et  $\vec{\nabla}$  symbolise l'opérateur vectoriel nabla.

L'accélération convective peut s'écrire en remarquant que pour les fluides irrotationnels  $\vec{\nabla} \times \vec{q} = 0$  :

$$(\vec{q} \cdot \vec{\nabla}) \vec{q} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} q^2 - \vec{q} \times (\vec{\nabla} \times \vec{q}) = \frac{1}{2} \vec{\nabla} q^2 \quad (6.2)$$

De plus comme le fluide est irrotationnel nous pouvons dériver sa vitesse à partir d'un potentiel scalaire  $\vec{\Phi}$  tel que :

$$\vec{q} = -\vec{\nabla} \Phi \quad (6.3)$$

On peut alors réécrire l'équation (6.1) en utilisant les équations (6.2) et (6.3); soit :

$$\vec{\nabla} \left( \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} q^2 + gZ' - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (6.4)$$

Soit encore en intégrant :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} q^2 + gZ' - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = C(t) \quad (6.5)$$

<sup>①</sup> Il remarqua aussi que le problème avait des similitudes avec un pendule dans lequel le point fixe est soumis à une vibrations.

<sup>②</sup> Un excellent résumé peut être trouvé dans [8].

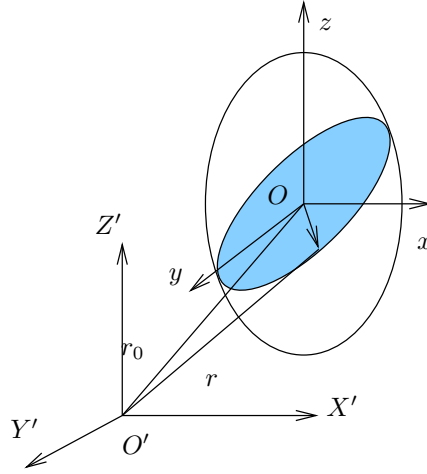


FIG. 6.1: Réservoir rempli de liquide dans un référentiel fixe et mobile.

où  $C(t)$  est une fonction arbitraire dépendant du temps. Cette équation est aussi appelée équation de Kelvin pour un fluide non stationnaire. Dans cette équation,  $\Phi$  est une fonction de l'espace et du temps, et sa dérivée en fonction du temps décrit le caractère non stationnaire du fluide. Cependant il convient de noter que  $\partial\Phi/\partial t$  peut être aussi interprété comme le travail réalisé par une particule fluide située en  $(X, Y, Z)$ . De plus, comme le fluide est considéré incompressible on a  $\vec{\nabla} \cdot \vec{q} = 0$ , soit en utilisant l'équation (6.3) :

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (6.6)$$

Le potentiel  $\Phi$  ne peut donc être totalement arbitraire et doit donc satisfaire à l'équation de Laplace (6.6).

Définissons maintenant le référentiel  $(OXYZ)$  dans lequel le réservoir est stationnaire et tel que le plan  $(Oxy)$  coïncide avec la surface libre du liquide au repos. Soit  $\vec{V}_0 = d\vec{OO'}/dt$  définissant la vitesse du réservoir. Dans le nouveau référentiel  $(O'X'Y'Z')$  la dérivée du potentiel  $\Phi$  se transforme en utilisant (6.3) en  $(\partial/\partial t - \vec{V}_0 \cdot \vec{\nabla})\Phi$ . En effet, du point de vue de l'observateur le point  $(X, Y, Z)$  sera animé d'une vitesse  $-\vec{V}_0$ . Soit, en réécrivant l'équation (6.5) dans le nouveau référentiel  $(O'X'Y'Z')$  :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}q^2 + gZ' - \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{V}_0 \cdot \vec{\nabla}\Phi = C(t) \quad (6.7)$$

Au niveau de la surface libre ( $Z' = \nu(x, y, t)$ ), la pression est égale à la pression atmosphérique ou encore peut être prise comme nulle en remarquant qu'on peut l'intégrer dans  $C(t)$ ; soit en utilisant une nouvelle fois (6.3) :

$$\frac{1}{2}(\vec{\nabla}\Phi \cdot \vec{\nabla}\Phi) + g\nu - \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{V}_0 \cdot \vec{\nabla}\Phi = C(t) \quad (6.8)$$

Soit encore en remarquant que  $C(t)$  peut être absorbé dans le potentiel  $\Phi$  :

$$\frac{1}{2}(\vec{\nabla}\Phi \cdot \vec{\nabla}\Phi) + g\nu - \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \vec{V}_0 \cdot \vec{\nabla}\Phi = 0 \quad (6.9)$$

Cette équation, appelée condition de la limite dynamique, donne la première condition de fermeture du problème de Laplace.

Dans l'équation (6.7),  $\vec{q}$  est encore défini par rapport à l'ancien référentiel. Définissons maintenant  $\vec{q}_{\text{rel}}$  dans le nouveau référentiel :

$$\vec{q}_{\text{rel}} = \vec{q} - \vec{V}_0 = -\vec{\nabla}\Phi - \vec{V}_0 \quad (6.10)$$

Au niveau de la surface libre, la vitesse d'une particule fluide doit être prise égale à la vitesse de la surface libre, ce qui peut s'exprimer comme :

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \nu}{\partial t} + \vec{q}_{\text{rel}} \cdot \vec{\nabla} n \quad (6.11)$$

Cette équation définit alors la deuxième condition aux limites dite condition de la vitesse de la surface libre.

Les autres conditions de fermeture de l'équation de Laplace font intervenir les conditions au niveau du réservoir supposé parfait c'est-à-dire la vitesse du fluide normale au réservoir doit être la même que la vitesse normale du réservoir<sup>①</sup> ; soit en un point  $S$  de la surface du réservoir décrit par son vecteur normal  $\vec{n}_S$  :

$$\vec{\nabla} \Phi \Big|_S \cdot \vec{n}_S = \vec{V}_0 \Big|_S \cdot \vec{n}_S \quad (6.12)$$

L'équation de Laplace (6.6) ainsi que les trois équations de fermeture (6.9), (6.11) et (6.12) définissent complètement le problème physique.

### 6.2.2.2 Application à un cylindre

Le problème de Laplace est un cas bien connu de système linéaire : une excitation à une fréquence donnée donnera une réponse à la même fréquence. Ce système possède aussi une infinité de valeurs propre, qui caractérise la résonance de la structure. Ces valeurs de résonance dépendent fortement de la géométrie. A titre d'exemple il peut être prouvé que dans le cas d'un réservoir cylindrique de rayon  $R$  et rempli d'une hauteur  $h$  le potentiel peut s'écrire à l'aide des harmoniques cylindriques :

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \sum_{m \geq 0, n \geq 0, s \in \{0,1\}} \frac{da_{mns}}{dt} G_{mns}(k_{mn}r, \theta) \frac{\cosh[k_{mn}(z+h)]}{\cosh(k_{mn}h)} \quad (6.13)$$

$a_{mns}(t)$  est une fonction temporelle dépendante des conditions initiales. Appelons  $\xi_{mn}$  le produit  $k_{mn}R$ , les  $\xi_{mn}$  sont alors les racines de :

$$\frac{dJ_m(\xi_{mn})}{d\xi} = 0 \quad (6.14)$$

Les valeurs de ces racines sont données en annexe A. Les harmoniques cylindriques sont données par :

$$G_{mns}(\xi, \theta) = \begin{cases} \cos(n\theta) J_m(\xi) & \text{si } s = 0 \\ \sin(n\theta) J_m(\xi) & \text{si } s = 1 \end{cases} \quad (6.15)$$

Une représentation graphique des harmoniques cylindriques est donnée à l'annexe A.

À partir du nombre d'onde  $k_{mn}$ , il est possible de déterminer les fréquences propres :

$$\omega_{mn}^2 = \left[ g + \frac{\sigma k_{mn}^2}{\rho} \right] k_{mn} \tanh(k_{mn}h) \quad (6.16)$$

avec  $\sigma$  la tension de surface ( $\sigma = 0.0728 \text{ J/m}^2$  pour de l'eau),  $g$  l'accélération de la gravité, et  $\rho$  la densité ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  pour de l'eau). Ce qui peut s'écrire en faisant intervenir le nombre de Bond  $Bo = \rho g R^2 / \sigma$  qui est le rapport entre les forces capillaires et la force de la gravité :

$$\omega_{mn}^2 = \left[ 1 + \frac{\xi_{mn}^2}{Bo} \right] g k_{mn} \tanh(k_{mn}h) \quad (6.17)$$

On s'aperçoit alors que la tension de surface augmente de manière très sensible la fréquence propre. En effet (6.16), se simplifie alors dans le cas non capillaire ( $Bo \gg 1$ ) en :

$$\omega_{mn}^2 = g k_{mn} \tanh(k_{mn}h) \quad (6.18)$$

<sup>①</sup> La vitesse tangentielle est supposée libre.

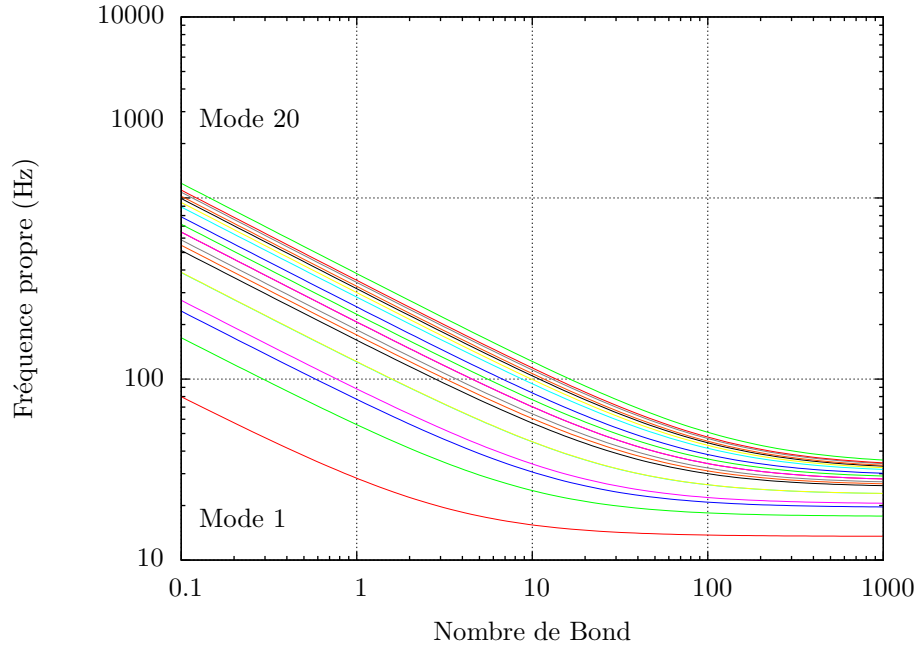


FIG. 6.2: Evolution de la fréquence propre des 20 premiers modes en fonction du nombre de bond dans un reservoir de 2.5 mm remplie de 5 mm de fluide soumis à la gravité terrestre.

Le comportement au faible  $Bo$  est alors totalement différent cette loi passant de  $\omega_{mn} \propto k_{mn}^{1/2}$  pour  $Bo \gg 1$  à  $\omega_{mn} \propto k_{mn}^{3/2}$  pour  $Bo \ll 1$  :

$$\omega_{mn}^2 = \left[ \frac{g}{k_{mn}^2} + \frac{\sigma}{\rho} \right] k_{mn}^3 \tanh(k_{mn}h) \quad (6.19)$$

À titre d'exemple un calcul qui correspondrait à notre cas d'étude, soit un récipient cylindrique de rayon 2.5 mm, rempli de 5 mm d'eau ( $\sigma = 0.0728 \text{ J/m}^2$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ), a été effectué dans le tableau 6.1 et sur la figure 6.2

La hauteur d'eau n'a que peu d'influence sur les fréquences propres dans notre cas de petit réservoir. En effet à 10% près pour  $x > 1.5$ ,  $\tanh x \simeq 1$ . Cette influence apparaît de plus en plus négligeable pour les modes d'ordre supérieur (en effet  $\xi_{mn}$  est croissant). Un exemple est donnée sur la figure 6.3.

Le rayon du réservoir a quand à lui une importance plus importante, intervenant directement dans le terme dominant  $gk_{mn}$  de  $\omega_{mn}^2$ . La variation de fréquences propres est alors une famille d'hyperboles de type  $1/\sqrt{R}$ . Les structures composites n'étant pas parfaites, et en particulier la taille de la cellule n'étant pas strictement identique de cellule en cellule, un petit calcul de variation est utile :

$$f_{mn}(R + \delta R) \simeq f_{mn}(R) \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\delta R}{R} + o\left(\frac{\delta R}{R}\right) \right] \quad (6.20)$$

Il apparaît donc qu'une variation de  $R$  autour d'un rayon moyen, apportera une faible erreur au niveau de la fréquence de résonance. Les courbes de variations des fréquences propres du réservoir en fonction de  $R$  sont données par la figure 6.4.

### 6.2.2.3 Calcul des pertes

Il est nécessaire dans le cadre de la théorie développée dans le calcul des modes de Faraday de connaître les pertes des modes linéaires. La première approche due à Landau permet de connaître les pertes due à la surface libre [9, §25] :

$$\zeta_{mn} = 2\nu k_{mn}^2 \quad (6.21)$$

mode ( $\ell$ )	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
mode ( $n, m$ )	(1, 0)	(2, 0)	(0, 0)	(3, 0)	(4, 0)	(1, 1)	(5, 0)	(2, 1)	(0, 1)	(6, 0)
$f_{mn}$ en Hz selon (6.18)	14	17	20	20	23	23	25	26	26	27
$f_{mn}$ en Hz selon (6.16)	30	61	84	96	135	136	178	190	204	225

TAB. 6.1: Fréquences de résonance des  $\ell$  premier mode dans le cas linéaire sans et avec capillarité pour de l'eau.  $R = 2.5$  mm,  $h = 5$  mm.

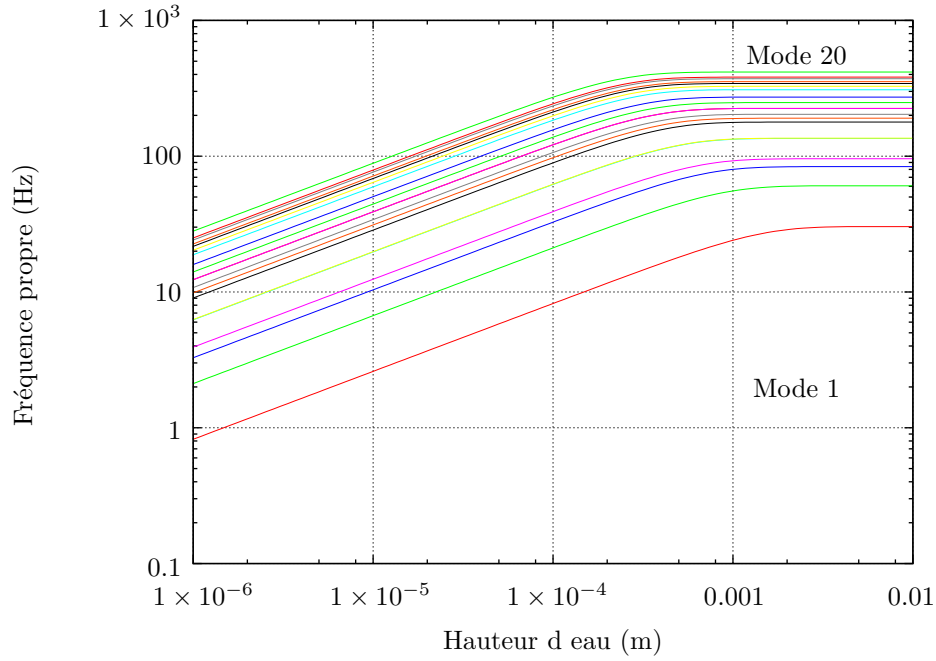


FIG. 6.3: Évolution de la fréquence propre des 20 premiers modes en fonction de la hauteur d'eau pour un récipient de 2.5 mm de rayon

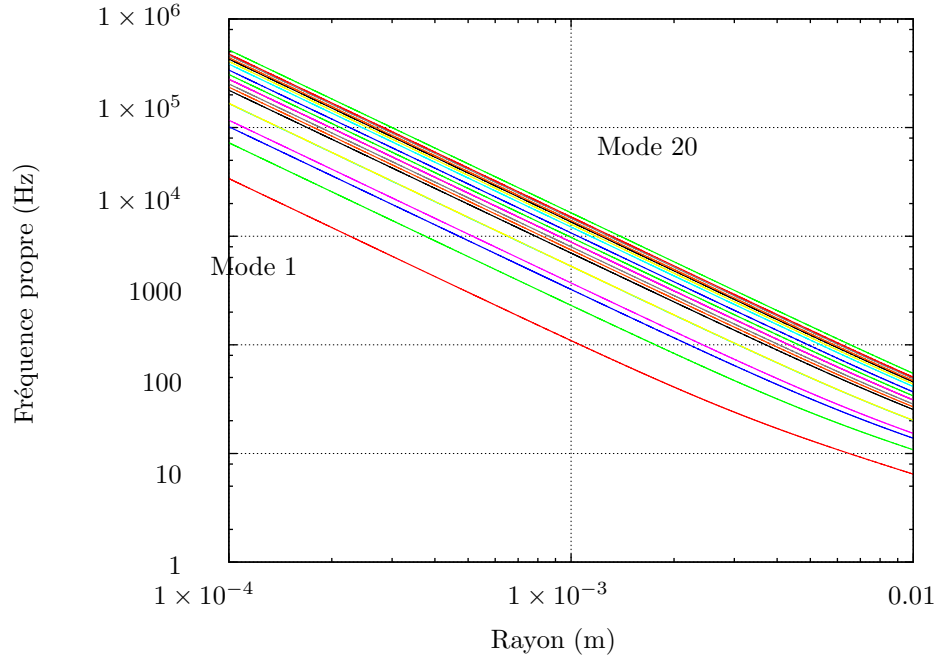


FIG. 6.4: Évolution de la fréquence propre des 20 premiers modes en fonction du rayon dans un réservoir rempli avec 5 mm d'eau.

Ces pertes sont partielles, ne sont valables que dans le cas des grands réservoirs, et ne tiennent pas compte des conditions au niveau des bords (couche limite). Malheureusement les expressions disponibles dans la littérature [8] ne sont plus valables (pertes négative) dans notre cas d'étude où  $Bo \simeq 1$ .

#### 6.2.2.4 Les limites

Ce modèle bien qu'utile et assez aisé d'utilisation ne permet pas de retrouver les fréquences expérimentales. Les fréquences obtenues étant trop faibles par rapport à l'expérience, il convient donc de rechercher un modèle plus satisfaisant adapté à notre problème, c'est-à-dire le cas où  $Bo = 0.87$ , soit un cas dans lequel les phénomènes capillaires ne sont plus négligeables.

De plus, le choix du type de condition aux limites libres peut être discuté.

Pour cela un modèle tenant compte de la totalité des effets capillaires doit être mis au point. Modèle d'autant plus nécessaire que la valeur des pertes n'est pas connue précisément.

### 6.2.3 Le modèle de Kidambi

#### 6.2.3.1 Le modèle physique

**La base de fonction** Le modèle développé ici est basé sur le travail [10]. On considère les petites oscillations d'un liquide remplissant un réservoir cylindrique de rayon  $R$ . L'interface statique est considérée faire un angle de  $\theta_c$  au niveau de la ligne triple (explicité de manière graphique sur la figure 6.5). La distance  $H$  est mesurée entre le bas du cylindre et la ligne triple. En utilisant des distances normalisées par  $R$  et le temps par  $\sqrt{R/g}$ , en notant par  $\Omega = \Omega_r + i\Omega_i$  la fréquence normalisée, les équations de Navier-Stokes linéarisées autour de l'état de repos s'écrivent :

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad \Omega \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \frac{1}{Re} \vec{\nabla}^2 \vec{u} \quad (6.22)$$

avec  $\vec{u}$  le vecteur vitesse,  $p$  la pression réduite (incluant la gravité) et  $Re$  le nombre de Reynolds ( $Re = \sqrt{gR^3}/\nu$ ).



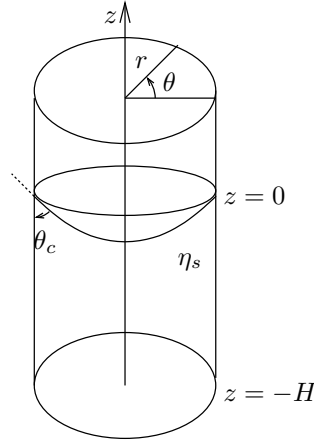


FIG. 6.5: Schéma du modèle de KIDAMBI et notations.

L'idée est alors de chercher  $\vec{u}$  sous la forme d'une décomposition de Helmotz :

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \Phi + \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (6.23)$$

On identifie alors que  $p = -\Omega \Phi$  et que  $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$  doit satisfaire l'équation de Helmotz vectorielle :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \Omega Re \vec{B} \quad (6.24)$$

De plus en réinjectant  $\phi$  dans l'équation d'incompressibilité on obtient que  $\phi$  doit respecter l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6.25)$$

Les modes propres du Laplacien scalaire en cylindrique sont bien connus<sup>①</sup> :

$$\phi(r, \theta, z) = e^{ikz} \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ \sin m\theta \end{pmatrix} J_m(kr) \quad (6.26)$$

Il existe deux champs vectoriels qui satisfont  $\vec{\nabla}^2 = \Omega Re \vec{B}$  et  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  en cylindrique [11, 12] :

$$\vec{B}_1 = e^{kz} \begin{bmatrix} \vec{e}_r \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ -\sin m\theta \end{pmatrix} [J_{m-1}(\alpha r) + J_{m+1}(\alpha r)] \\ - \vec{e}_\theta \begin{pmatrix} \sin m\theta \\ \cos m\theta \end{pmatrix} [J_{m-1}(\alpha r) - J_{m+1}(\alpha r)] \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

$$\vec{B}_2 = e^{kz} \begin{bmatrix} k \vec{e}_r \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ -\sin m\theta \end{pmatrix} [J_{m-1}(\alpha r) - J_{m+1}(\alpha r)] \\ - k \vec{e}_\theta \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ -\sin m\theta \end{pmatrix} [J_{m-1}(\alpha r) + J_{m+1}(\alpha r)] + 2\alpha \vec{e}_z \begin{pmatrix} \cos m\theta \\ \sin m\theta \end{pmatrix} J_m(\alpha r) \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Avec<sup>②</sup>  $\alpha = \sqrt{k^2 - \Omega Re}$ .

Le champ de vitesse peut donc s'écrire :

$$\vec{u} = C \vec{\nabla} \Phi + A \vec{B}_1 + B \vec{B}_2 \quad (6.29)$$

<sup>①</sup> La solution en  $Y_n$  est implicitement éliminée du fait de la géométrie du problème.

<sup>②</sup> En remarquant que la solution  $\alpha = -\sqrt{k^2 - \Omega Re}$ , laisse  $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_2$  inchangés ou les change en leurs opposés suivant que  $m$  est pair ou impair, ne changeant pas ainsi la nature de la base. Ainsi seule la solution positive sera retenue.

Avec  $A$ ,  $B$ , et  $C$  des constantes fixées par les conditions aux limites sur les bords du cylindre. En considérant que les modes symétrique<sup>①</sup>, ce champ s'écrit composantes par composantes :

$$u_r = e^{kz} \cos m\theta [CkJ'_m(kr) + A(J_{m-1}(\alpha r) + J_{m+1}(\alpha r)) + Bk(J_{m-1}(\alpha r) - J_{m+1}(\alpha r))] \quad (6.30)$$

$$u_\theta = -e^{kz} \sin m\theta \left[ C \frac{m}{r} J_m(kr) + A(J_{m-1}(\alpha r) + J_{m+1}(\alpha r)) + Bk(J_{m-1}(\alpha r) + J_{m+1}(\alpha r)) \right] \quad (6.31)$$

$$u_z = e^{kz} \cos m\theta [CkJ_m(kr) + 2B\alpha J_m(\alpha r)] \quad (6.32)$$

Ou encore en abrégant les notations :

$$u_r = e^{kz} \cos(m\theta) p_m^1(r) \quad (6.33)$$

$$u_\theta = -e^{kz} \sin(m\theta) p_m^2(r) \quad (6.34)$$

$$u_z = e^{kz} \cos(m\theta) p_m^3(r) \quad (6.35)$$

Ce système d'équation ne tient pas compte des conditions aux limites comme dans [10] imposons que la vitesse soit nulle pour  $r = 1$  soit :  $u_r(1, \theta, z) = u_\theta(1, \theta, z) = u_z(1, \theta, z) = 0$ . Soit la relation :

$$4k^2 J_{m-1}(\alpha) J_m(k) J_{m+1}(\alpha) + k\alpha J_m(\alpha) [J_{m-1}(k) - J_{m+1}(k)] [J_{m-1}(\alpha) - J_{m+1}(\alpha)] - 4m^2 J_m(k) J_m^2(\alpha) = 0 \quad (6.36)$$

Une subtilité numérique convient d'être notée, dans le cas qui nous intéresse  $k$  est complexe, or pour des raisons numériques il convient diviser les fonctions de Bessel par  $\exp(|\Im k|)$  afin de conserver une précision suffisante [13]. Cette division peut être menée sans peine au niveau de l'équation (6.36). Notons aussi que si  $k$  est solution de (6.36), et que  $C_k$  est une constante arbitraire alors :

$$A_k = C_k \frac{m J_m(k) (1 - k^2/\alpha^2)}{J_{m+1}(\alpha) - J_{m-1}(\alpha)} \quad B_k = -C_k \frac{k}{2\alpha} \frac{J_m(k)}{J_m(\alpha)} \quad (6.37)$$

On remarque alors qu'appliquer une normalisation au  $J_m(k)$  dans l'expression du vecteur vitesse, revient tout simplement à choisir  $C_k$ .

Pour  $m > 0$ , la solution  $\alpha = 0$  c'est à dire  $k = \pm\sqrt{\Omega Re}$ , doit être éliminée car menant à la solution triviale  $A = B = C = 0$ . Pour  $m = 0$  la solution  $\alpha = 0$  correspond alors  $u_r = \cos m\theta(A + kB)$ ,  $u_\theta = -\sin m\theta(A + kB)$  et  $u_z = 0$  soit  $A + kB = 0$  qui correspond à la solution triviale.

L'équation (6.23) fournit une base pour notre problème. Les conditions de fermeture au niveau de la surface et du fond peuvent être exprimées à l'aide de cette base. Pour cela décomposons  $\phi$  en  $2N_v$  fonctions ( $N_v \rightarrow +\infty$ ) :

$$\phi = \cos m\theta \sum_{n=1}^{N_v} C_n J_m(k_n r) \left( a_n \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} + d_n \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \right) \quad (6.38)$$

De même l'expression de  $\vec{u}$  peut se décomposer en :

$$u_r = \cos(m\theta) \sum_{n=1}^{N_v} \left[ p_m^1(r) \left( a_n \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} + d_n \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \right) \right] \quad (6.39)$$

$$u_\theta = -\sin(m\theta) \sum_{n=1}^{N_v} \left[ p_m^2(r) \left( a_n \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} + d_n \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \right) \right] \quad (6.40)$$

$$u_z = \cos(m\theta) \sum_{n=1}^{N_v} \left[ p_m^3(r) \left( a_n \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} + d_n \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \right) \right] \quad (6.41)$$

---

<sup>①</sup> Les modes antisymétrique ayant par des considérations physiques la même fréquence complexe de résonance.

**Le ménisque** On recherche les petites variations autour de l'état de repos du ménisque. Il convient donc de calculer le profil du ménisque statique  $\eta_s(r)$  à l'aide de l'équation différentielle d'Euler-Lagrange en cylindrique sur  $r \in [0, 1]$  :

$$\eta_s'' + \frac{\eta_s'}{r}(1 + \eta_s'^2) + Bo(n_s - \lambda)(1 + \eta_s'^2)^{3/2} = 0 \quad (6.42)$$

Soumis aux conditions aux limites  $\eta_s'(1) = \tan \theta_c$ ,  $\eta_s(1) = 0$  avec  $\theta_c$  l'angle de contact.  $\lambda$  est un multiplicateur de Lagrange tel que  $\eta_s'(0, \lambda) = 0$ . On pose  $\kappa_s = Bo(\eta_s - \lambda)$ .

La surface libre sera recherchée dans le cas où la ligne triple est fixe, sous la forme d'une série de Bessel-Fourrier[14], qui est une base complète orthogonale et satisfait de manière naturelle  $\vec{u}(r = 1) = 0$  :

$$\eta(r, \theta) = \cos m\theta \sum_{n=1}^{N_v} g_n \frac{J_m(\Xi_{mn}r)}{|J_{m+1}(\Xi_{xn})|} \quad (6.43)$$

Avec  $\Xi_{mn}$  les racines de  $J_m$  et le facteur de normalisation tel que :

$$\int_0^1 r \frac{J_m(\Xi_{mn}r)}{|J_{m+1}(\Xi_{xn})|} \frac{J_m(\Xi_{m\ell}r)}{|J_{m+1}(\Xi_{x\ell})|} dr = \frac{1}{2} \delta_{n\ell} \quad (6.44)$$

**Les conditions aux limites** Au niveau de la surface il n'apparaît pas de tension latérale, ce qui se traduit au niveau de la surface statique par :

$$\left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) (\eta_s' - 1) + 2\eta_s' \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = 0 \quad (6.45)$$

Qui une fois projeté dans les la bases du paragraphe précédent mène à l'équation :

$$\sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^1(r) a_n + \gamma_n^1 d_n] = 0 \quad (6.46)$$

Les coefficients  $\beta_n^1$  et  $\gamma_n^1$  sont donnés en annexe C à la section C.1.

De même l'absence de tension latérale se traduit par :

$$r \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \eta_s' \left( \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta + r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) = 0 \quad (6.47)$$

Soit une fois projeté :

$$\sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^2(r) a_n + \gamma_n^2 d_n] = 0 \quad (6.48)$$

La condition cinétique ce traduit par :

$$u_r \eta_s' - u_z + \Omega \eta = 0 \quad (6.49)$$

Soit une fois projeté :

$$\sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^3(r) a_n + \gamma_n^3 d_n] + \Omega \sum_{n=1}^{N_v} \zeta_n^3(r) g_n = 0 \quad (6.50)$$

La condition de contrainte normale au niveau de la surface du ménisque ( $z = \eta_s(r)$ ) s'écrit :

$$p - \frac{2}{Re} \frac{1}{1 + \eta_s'^2} \left[ \frac{\partial u_z}{\partial z} + \eta_s'^2 \frac{\partial u_r}{\partial r} - \eta_s' \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] - \eta + \frac{1}{Bo} \left[ \frac{1}{(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{\partial \eta}{\partial r} \left( \frac{1 + 3\eta_s'^2}{r(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} - \frac{3\eta_s' \kappa_s}{1 + \eta_s'^2} \right) + \frac{1}{r^2(1 + \eta_s'^2)^{1/2}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2} \right] = 0 \quad (6.51)$$

En utilisant  $p = -\Omega\phi$  et en multipliant l'expression par  $-r^2\sqrt{Re}$  :

$$\Omega r^2 \sqrt{Re} \phi + \frac{2r^2}{\sqrt{Re}} \frac{1}{1 + \eta_s'^2} \left[ \frac{\partial u_z}{\partial z} + \eta_s'^2 \frac{\partial u_r}{\partial r} - \eta_s' \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right] + r^2 \eta \sqrt{Re} - \frac{\sqrt{Re}}{Bo} \left[ \frac{r^2}{(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + r \frac{\partial \eta}{\partial r} \left( \frac{1 + 3\eta_s'^2}{(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} - r \frac{3\eta_s' \kappa_s}{1 + \eta_s'^2} \right) + \frac{1}{(1 + \eta_s'^2)^{1/2}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2} \right] = 0 \quad (6.52)$$

Ce qui mène après projection au système :

$$\Omega \sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^4(r) a_n + \gamma_n^4 d_n] + \sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^5(r) a_n + \gamma_n^5 d_n] + \sum_{n=1}^{N_v} \zeta_n^5(r) g_n = 0 \quad (6.53)$$

La condition de non glissement au fond du cylindre s'écrit :

$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \quad (6.54)$$

Soit après projection :

$$\sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^6(r) a_n + \gamma_n^6 d_n] = 0 \quad \sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^7(r) a_n + \gamma_n^7 d_n] = 0 \quad \sum_{n=1}^{N_v} [\beta_n^8(r) a_n + \gamma_n^8 d_n] = 0 \quad (6.55)$$

**Les fonctions d'essais** La ligne triple étant fixe, physiquement les modes seront proches de ceux d'une membrane fixe qui sont bien connus, de la forme pour un mode symétrique :

$$F(\theta, r) = \cos m\theta J_m(\Xi_{mn} r) \quad (6.56)$$

Nous projeterons donc les  $\beta_n^i$ , les  $\gamma_n^i$  et les  $\zeta_n^i$  sur la base complète et orthogonale [14] des  $M$  fonction d'essais :

$$f_m(r) = J_m(\Xi_{mn} r) \quad (6.57)$$

Nous noterons alors  $\beta_{nm}^i$ , les  $\gamma_{nm}^i$  et les  $\zeta_{nm}^i$  les  $\beta_n^i$ , les  $\gamma_n^i$  et les  $\zeta_n^i$  projeté sur la  $m$ -ième fonction de la base.

**Le problème aux valeurs propres** Notons  $\vec{v}$  le vecteur  $\vec{v} = (a_1, \dots, a_{N_v}, d_1, \dots, d_{N_v})^T$  le vecteur de dimension  $2N_v$  des composantes vitesse, et  $\vec{g}$  le vecteur de déplacement de la surface libre  $\vec{g} = (g_1, \dots, g_n)^T$ . Les conditions aux limites peuvent alors s'écrire :

$$V^1 \vec{v} = 0 \quad V^2 \vec{v} = 0 \quad V^6 \vec{v} = 0 \quad V^7 \vec{v} = 0 \quad V^8 \vec{v} = 0 \quad (6.58)$$

Avec  $V^i$  les matrices  $M \times 2N_v$  définies par  $V^i(n, m) = \beta_{nm}^i$  et  $V^i(N_v + n, m) = \gamma_{nm}^i$ . En faisant intervenir les matrices  $Q^i$  de taille  $M \times N$  et définies par  $M^i(n, m) = \zeta_{nm}^i$  on peut exprimer les deux relations restantes :

$$V^2 \vec{v} + \Omega M^3 \vec{g} = 0 \quad V^5 \vec{v} + \Omega M^5 \vec{g} + \Omega V^4 \vec{v} = 0 \quad (6.59)$$

Le système en blocs se lit donc :

$$\begin{bmatrix} V^1 & 0 \\ V^2 & 0 \\ V^6 & 0 \\ V^7 & 0 \\ V^8 & 0 \\ V^3 & 0 \\ V^5 & Q^5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{v} \\ \vec{g} \end{pmatrix} = -\Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Q^3 \\ V_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{v} \\ \vec{g} \end{pmatrix} \quad (6.60)$$

En prenant  $M = 3N_v$  on obtient donc un système aux valeurs propres généralisées de type :

$$A \vec{x} = \lambda B \vec{x} \quad (6.61)$$

Ce système peut alors être résolu par une méthode numérique de type QZ [15, 16] par exemple, qui a l'avantage de fonctionner même si  $A$  et  $B$  sont singulières.

Ce problème aux valeurs propre est non linéaire. En effet, l'expression des  $\alpha_n$  change en fonction du  $\Omega$  obtenu dans l'équation (6.60), changeant ainsi l'expression de la base de fonction, les expressions des  $p_n^i$  et donc le problème (6.60).

**L'algorithme** L'algorithme de résolution du problème non linéaire peut alors s'écrire :

```

 $\Omega \leftarrow \text{Invid}(r, h)$  ▷ Calcule la valeur initiale à l'aide de la théorie présenté en 6.2.2
repeat
   $\Omega_o \leftarrow \Omega$ 
   $k_n \leftarrow \text{Calcul}k(r, Re, \Omega)$  ▷ Calculer les  $k_n$  en résolvant l'équation (6.36)
   $[V, Q] \leftarrow \text{calculVQ}(r, Re, Bo, h, k_n)$  ▷ Calculer les matrices  $V$  et  $Q$ 
   $\Omega \leftarrow \text{QZ}(V, Q)$  ▷ Calcule  $\Omega$  solution de (6.60)
until  $|\Omega - \Omega_o| < \varepsilon$  ▷ Jusqu'à converger

```

### 6.2.3.2 Application à notre cas d'étude

La théorie précédente a été appliquée à notre cas d'étude c'est à dire un réservoir de 2.5 mm de rayon remplie de 5 mm d'eau. Soit  $h = 2$  (réduit),  $Re = 392$ ,  $Bo = 0.87$ .

**Calcul des  $k_n$**  Les  $k_n$  sont calculés en commençant aux faibles  $Re$  ( $Re \simeq 1$ ) et en suivant l'évolution des racines pour les  $Re$  plus élevés. L'approximation invicide donne  $f = 30$  Hz et des pertes en utilisant l'approximation de Landau, on obtient alors une pulsation réduite complexe de  $\Omega = 3 - i0.0174$ . Les solutions de l'équation (6.36) sont organisées suivant trois branches (voir figure 6.6a), on remarque que les deux branches tel que  $\Im k_n > 0$  deviennent quasiment confondues pour les forts  $Re$  (figure 6.6b).

**Calcul des fréquences propres** Le programme a été testé dans le cas de grand reservoir puis dans notre cas d'étude pour le premier mode (voir figure ??). La valeur pour  $Bo = 0.87$  comme nous le verrons par la suite est bien corrélée à l'expérimentation.

### 6.2.3.3 Conditions aux limites de type glissante

Il est possible moyennant quelques modifications d'adapter la méthode précédente au cas dans lequel les conditions aux limites sont de type glissante. La décomposition du champs de vitesse (6.29) est encore valide, ne change alors que l'équation de dispersion (6.36). En effet nous imposons alors :

$$u_r(1, \theta, z) = 0 \quad \left( \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \right) u_\theta(1, \theta, z) = 0 \quad \frac{\partial}{\partial r} u_z = 0 \quad (6.62)$$

Ces conditions aux limites imposent la relation de dispersion modale suivante :

$$\begin{vmatrix} kJ'_m(k) & 2\frac{m}{\alpha}J_m\alpha & 2kJ'_m(\alpha) \\ -2mJ_m(k) + mkJ'_m(k) & 2\alpha J''_m(\alpha) - 2J'_m(\alpha) & 2mJ'_m(\alpha) - 4\frac{m}{\alpha}J_m(\alpha) \\ k^2J'_m(k) & 0 & 2\alpha^2J'_m(\alpha) \end{vmatrix} = 0 \quad (6.63)$$

Dans le cas glissant  $A_k$  et  $B_k$  ont pour expression :

$$A_k = C_k k \alpha \frac{J'_m(k)(k^2/\alpha^2 - 1)}{2mJ_m(\alpha)} \quad B_k = -C_k \frac{k^2}{2\alpha^2} \frac{J'_m(k)}{J'_m(\alpha)} \quad (6.64)$$

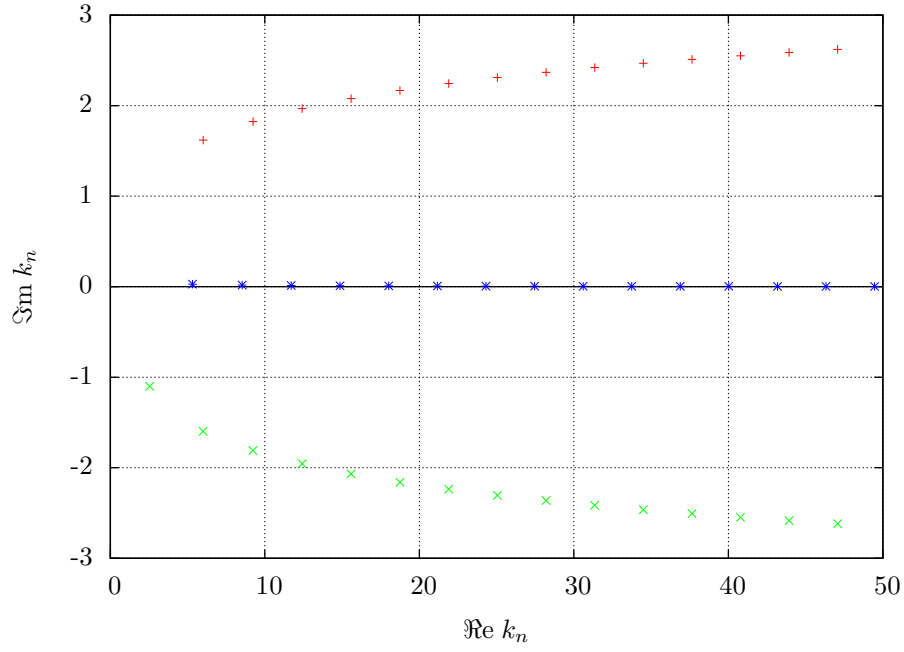
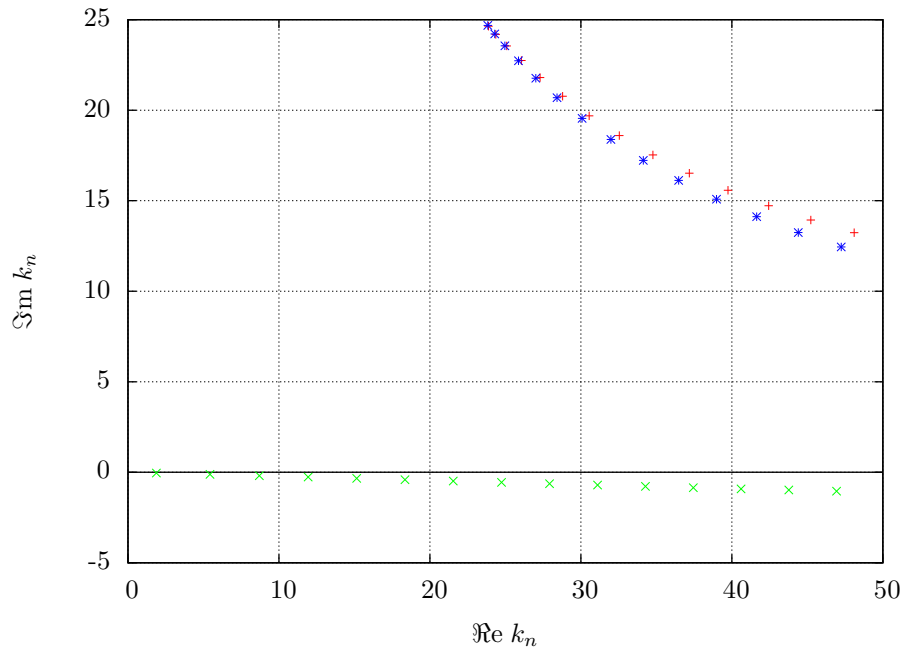
La surface libre est recherchée sous la forme d'une série de Bessel-Dini [14] de paramètre  $K = 0$  satisfaisant naturellement la condition au limite  $\partial\eta/\partial r = 0$  pour  $r = 1$ <sup>①</sup> :

$$\eta(r, \theta) = \cos m\theta \left( \frac{1}{2}g_0 + \sum_{n=1}^{N_v} g_n \frac{J_m(\xi_{mn}r)}{|J_{m+1}(\xi_{mn})|} \right) \quad (6.65)$$

Avec  $\xi_{mn}$  les racines de  $J'_m$  et le facteur de normalisation tel que :

$$\int_0^1 r \frac{J_m(\xi_{mn}r)}{N_{mn}} \frac{J_m(\xi_{m\ell}r)}{N_{m\ell}} dr = \delta_{n\ell} \quad (6.66)$$

<sup>①</sup>Notons que la serie de Bessel-Dini de manière générale contient un terme constant  $f(x) = g_0 + \sum_{n=1}^{\infty} g_n J_m(\alpha_{mn}x)$ . Néanmoins le terme  $g_0$  est nul dans le cas où  $K + m > 0$  soit dans ce cas  $m \neq 0$ .

(a)  $Re = 0.1$  Initialisation du calcul(b)  $Re = 392$ FIG. 6.6: Résolution de l'équation (6.36) pour  $\Omega = 3 - i0.0174$ .

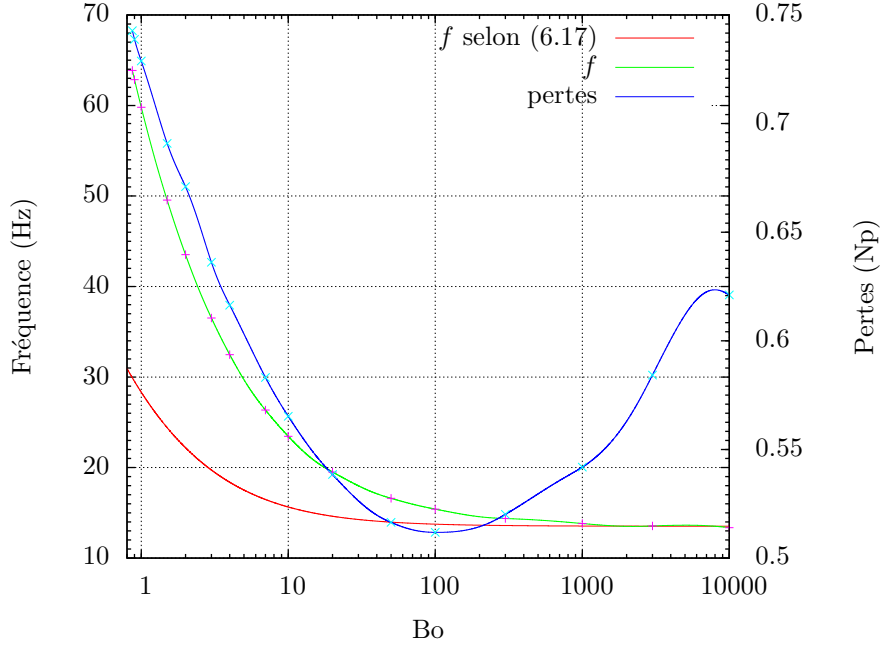


FIG. 6.7: Variation de la fréquence de résonance du premier mode et des pertes en fonction de  $Bo$  dans le cas où les conditions aux limites sont de type Dirichlet homogène. Comparaison avec la théorie simplifiée.

Avec  $N_{mn}$  défini par :

$$N_{mn}^2 = \frac{2\xi_{mn}^2}{(\xi_{mn}^2 - m^2)J_m^2(\xi_{mn})} \quad (6.67)$$

Il convient de noter que dans le cas,  $m = 0$  le facteur de normalisation du terme constant est :

$$\int_0^1 r dr = \frac{1}{2} \quad (6.68)$$

Les expressions des  $\beta$  et des  $\gamma$  ne changent pas par rapport au cas précédent sauf au fond où il convient d'imposer

$$\frac{\partial}{\partial z} u_\theta = 0 \quad \frac{\partial}{\partial z} u_r = 0 \quad u_z = 0 \quad (6.69)$$

Changeant ainsi les expressions des  $\beta^6, \gamma^6, \beta^7, \gamma^7, \beta^8$ , et  $\gamma^8$ . Les nouvelles expressions sont données à l'annexe C.2 page 150. Les résultats des calculs sont donnés par la figure 6.8.

#### 6.2.3.4 Conclusion et perspectives

Cette nouvelle méthode donne des résultats qui sont corrélés avec l'expérience comme nous le verrons par la suite. Ces calculs permettent ainsi de combler les manques de la méthode simplifiée. Néanmoins il convient de continuer les recherches dans plusieurs directions :

- Il est possible de manière simple de faire intervenir au niveau des murs des conditions aux limites plus générales dites de Navier, qui physiquement correspondent à un cas intermédiaire entre les conditions fixes et glissantes. Il suffit pour cela de refaire le même travail que dans le cas glissant mais avec  $H \neq 0$  dans l'expression de la série de Bessel-Dini.
- Plus intéressant, il semble possible de séparer la dynamique du ménisque et les conditions aux limites au niveau du bord. Ainsi la dynamique de la surface libre pourra s'exprimer sous la forme d'une série de Bessel-Dini :

$$\eta(r, \theta) = \cos m\theta \left( \frac{1}{2}g_0 + \sum_{n=1}^{N_v} g_n \frac{J_m(\Psi_{mn}r)}{|J_{m+1}(\Psi_{mn})|} \right) \quad (6.70)$$

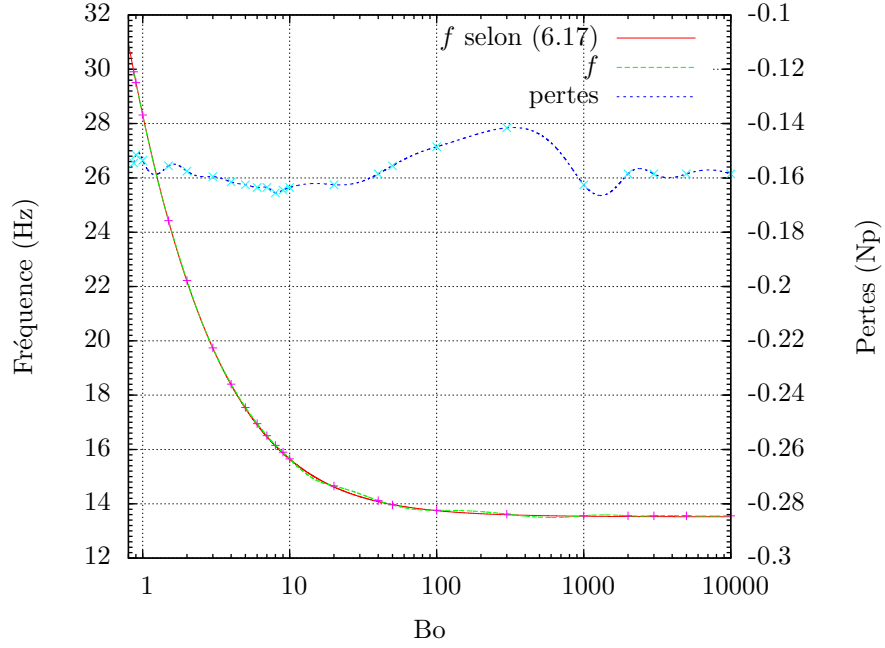


FIG. 6.8: Variation de la fréquence de résonance du premier mode et des pertes en fonction de  $Bo$  dans le cas où les conditions aux limites sont de type glissantes. Comparaison avec la théorie simplifiée. On remarque l'accord parfait entre les deux méthodes.

Avec  $\Psi_{mn}$  permettant de satisfaire la condition  $\eta(r=1, \theta) = v \neq 0$ . L'idée est alors d'utiliser comme base de fonction d'essais les  $M$  premiers termes de la série de Bessel-Fourier qui converge uniformément dans  $\mathcal{L}^2$  sur  $[0, 1[$  et qui en  $r=1$  converge ponctuellement vers 0. Ainsi le point  $r=1$ , ne rentre pas en compte directement dans les calculs et nous lisons à l'aide de cette base de fonction d'essais la discontinuité entre la surface libre et les bords. Bien entendu, il se peut que des phénomènes de GIBBS apparaissent mais cette modélisation permettra sûrement de représenter de manière plus fidèle la dynamique de la ligne triple, mouvante alors que le fluide est immobile au niveau des bords éloignés de la surface libre.

## 6.3 Excitation paramétrique d'un fluide : les ondes de Faraday

### 6.3.1 Introduction

Les ondes de Faraday ou encore *instabilité de Faraday* sont des ondes non linéaires de type sous harmoniques naissant à la surface d'un liquide. Historiquement elles furent au cœur d'un débat académique dès leur découverte par FARADAY [1], certains expérimentateurs ayant du mal à reproduire les résultats de Faraday et ne retrouvant pas le caractère sous harmonique mais plutôt le cas linéaire précédent [17]. Ce débat a été clos par Lord RAYLEIGH qui a reproduit de manière satisfaisante les expérimentations de FARADAY [2, 3] et relié ce problème à l'étude des équations de Mathieu [18], équations qui interviennent dans l'étude des oscillateurs paramétriques et en particulier le pendule dans lequel le point fixe est soumis à des vibrations.

Un oscillateur paramétrique est un oscillateur harmonique dans lequel un des paramètres (par exemple la fréquence de résonance ou le terme d'amortissement) varie en fonction du temps. Mathématiquement, ce type d'oscillateur peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \beta(t)\frac{dx}{dt} + \omega^2(t)x = 0 \quad (6.71)$$



Cette équation est linéaire en  $x(t)$ . Par hypothèse les paramètres  $\beta$  et  $\omega^2$  sont uniquement dépendant du temps.

### 6.3.2 L'équation de Mathieu

Dans le cas d'un réservoir cylindrique et en négligeant les effet visqueux il peut être prouvé après un long développement analytique [4] que l'amplitude  $a_m$  obéit à l'équation du type de Mathieu d'un forçage sinusoïdal de pulsation  $\Omega$  et d'amplitude  $Z_0 = f/\Omega^2$  :

$$\frac{d^2 a_{mn}}{dt^2} + k_{mn} \tanh(k_{mn} h) \left[ \frac{k_{mn}^2 \sigma}{\rho} + g - f \cos(\Omega t) \right] a_{mn} = 0 \quad (6.72)$$

avec  $k_{mn} = \xi_{mn}/R$ . Qui peut se mettre sous la forme canonique d'une équation de Mathieu en posant :

$$p_{mn} = \frac{4k_{mn} \tanh(k_{mn} h)}{\Omega^2} \left[ g + \frac{k_{mn}^2 \sigma}{\rho} \right] \quad q_{mn} = \frac{2k_{mn} f \tanh(k_{mn} h)}{\Omega^2} \quad T = \frac{1}{2} \Omega t \quad (6.73)$$

Soit :

$$\frac{d^2 a_{mn}}{dT^2} + [p_{mn} - 2q_{mn} \cos(2T)] a_{mn} = 0 \quad (6.74)$$

Soit encore sous la forme :

$$\frac{d^2 a_{mn}}{dt^2} + \omega_{mn}^2 [1 - 2\alpha \cos(\Omega t)] a_{mn} = 0 \quad (6.75)$$

En posant à partir de (6.72) :

$$\omega_{mn}^2 = g k_{mn} \tanh(k_{mn} h) \left[ 1 + \frac{\xi_{mn}^2}{Bo} \right] \quad (6.76)$$

$$\alpha = \frac{Z_0 \Omega^2}{2g} \left[ 1 + \frac{\xi_{mn}^2}{Bo} \right]^{-1} = Z_0 \Omega^2 \frac{\omega_{mn}^2 (Bo \rightarrow \infty)}{\omega_{mn}^2} \quad (6.77)$$

Avec  $\omega_{mn} (Bo \rightarrow \infty)$  la limite de  $\omega_{mn}$  quand  $Bo$  tend vers l'infini ( $\sigma$  tendant vers 0). On retrouve alors les pulsations propre du cas linéaire ci-dessus (voir l'équation (6.17)) qui correspond aux fréquences de résonance du problème sans forçage ( $Z_0 = 0$ ).  $p_{nm}$  et  $q_{mn}$  peuvent alors se réécrire :

$$p_{nm} = \left[ \frac{\omega_{mn}}{\frac{\Omega}{2}} \right]^2 \quad q_{nm} = \left[ \frac{\omega_{mn}}{\frac{\Omega}{2}} \right]^2 \alpha \quad (6.78)$$

Les équations introduites dans cette section possèdent deux inconvénients majeurs :

- Elles sont linéaires en  $a_{mn}$ . Si  $s$  est solution alors  $k \in \mathbb{C}$ ,  $ks$  sera solution. Elle ne permettent donc pas de calculer les amplitudes.
- Elles ne possède pas de terme d'amortissement, et ne permettent donc pas de connaître les taux de croissance des solutions instables, ni les amplitudes minimales permettant à l'instabilité de démarrer.

Il est possible d'introduire dans l'équation (6.72) un terme d'amortissement, correspondant à des pertes de volume :

$$\frac{d^2 a_{mn}}{dt^2} + 2\zeta \frac{da_{mn}}{dt} + \omega_{mn}^2 [1 - \alpha \cos(\Omega t)] a_{mn} = 0 \quad (6.79)$$

Le terme  $\zeta$  qui représente la dispersion sera discuté plus tard.

### 6.3.3 Étude au premier ordre

#### 6.3.3.1 Étude de l'équation de Mathieu classique

L'équation de Mathieu (6.74) est une équation du second ordre à coefficients périodiques. Ses solutions sont connues et sont une combinaison linéaire de la paire de fonctions dites de Mathieu :

$ce(p, q, x)$  appelée le cosinus de Mathieu (ou elliptique) et  $se(p, q, x)$  appelée le sinus de Mathieu (ou elliptique) [19].

L'étude de la stabilité de ces solutions est plus intéressante, il peut être prouvé que les solutions de cette équation peuvent être soit stables, soit instables. En effet (6.74) peut s'écrire :

$$\frac{d\vec{X}}{dT} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{mn}^2 [1 - \alpha \cos(\Omega t)] \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \vec{X} \quad (6.80)$$

avec  $\vec{X} = (da_{mn}/dT, a_{mn})$ . Le système étant sous la forme :

$$\frac{d\vec{X}}{dT} = A(T)\vec{X} \quad (6.81)$$

avec  $A(T)$   $2\pi$  périodique. On peut alors appliquer le théorème de Floquet [20]. La solution générale de l'équation de Mathieu est alors [21] :

$$\vec{X} = \vec{X}_+ e^{i\mu T} P(T) + \vec{X}_- e^{-i\mu T} P(-T), \quad (6.82)$$

Avec  $P(T)$  une fonction périodique,  $\vec{X}_+$  et  $\vec{X}_-$  deux vecteurs complexe,  $\mu$  un complexe dépendant de  $p_{nm}$  et  $q_{nm}$ ,  $i^2 = -1$ . Il paraît alors évident, à la vue de (6.82), que pour  $T \in \mathbb{R}^+$ , seules les solutions pour lesquelles  $\Re i\mu > 0$  sont instables. Comme  $T$  est un fait un temps normalisé, on déduit donc que la même condition s'applique pour  $t > 0$ . Calculer  $\mu$  est loin d'être trivial et est encore de nos jours sujet à recherche [22–24]. Il est néanmoins possible de tracer un diagramme de stabilité de l'équation de Mathieu (voir figure 6.9, limité aux cas de notre problème  $q_{nm} > 0$  et  $p_{nm} > 0$ ) c'est à dire les zones pour lesquelles  $\mu$  est réel.

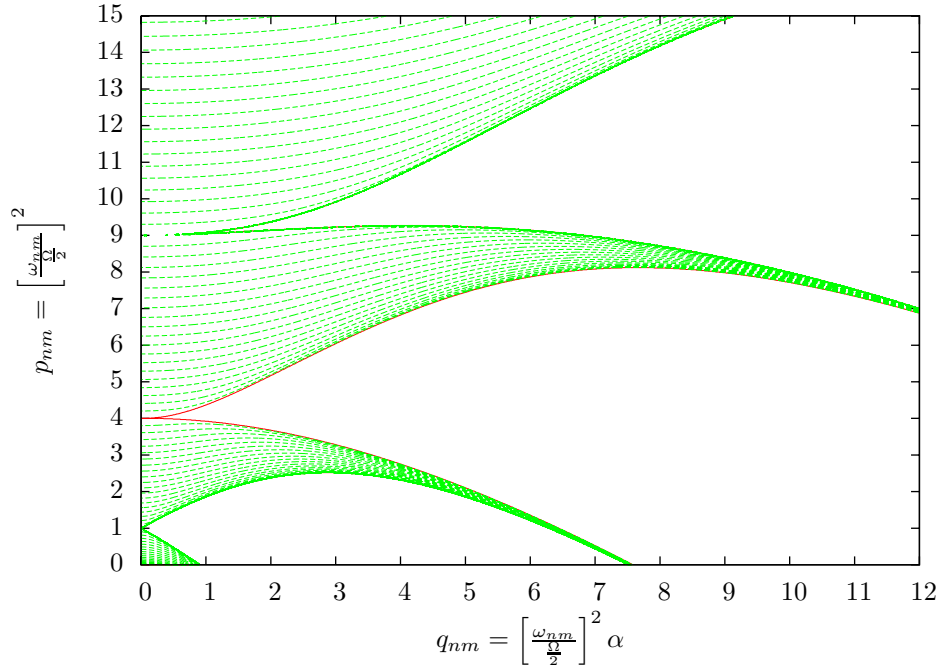


FIG. 6.9: Diagramme de stabilité de l'équation de Mathieu. Les regions ombrées sont stables. Calcul effectué à l'aide de [23]. Résultats identiques à [19].

Le diagramme de stabilité de Mathieu (voir figure 6.10) de manière plus physique en se ramenant au  $\omega_{mn}$  sur l'axe des  $p_{nm}$ . Il apparaît donc des résonances pour  $\Omega = 2\omega_{mn}, \Omega = \omega_{mn}, 3\Omega = 2\omega_{mn}, \dots$ . Néanmoins la plage de fréquences pour lesquelles ces résonances apparaissent diminue avec le rang de l'harmonique. Il convient de noter que ce phénomène n'est pas à rapprocher du cas de l'oscillateur harmonique. Les modes d'ordre supérieur ( $\Omega = \omega_{mn}, 3\Omega = 2\omega_{mn}, \dots$ ) seront donc d'une faible utilité pratique.

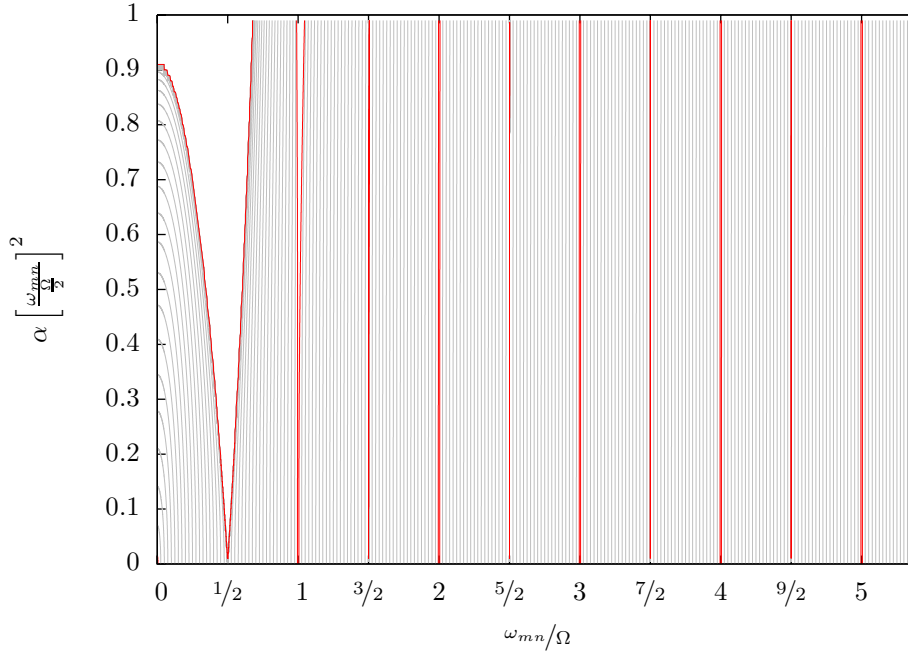


FIG. 6.10: Diagramme de stabilité de l'équation de Mathieu en fonction de  $\omega_{mn}$ . Les zones grisées sont stables. La limite de stabilité est en rouge.

En effet dans le cas de l'oscillateur harmonique, ce sont les pertes au travers du coefficient de qualité  $Q$  qui diminuent la plage de résonance. Dans notre cas les pertes sont nulles et c'est uniquement le couplage entre le forçage et le système qui diminue la plage de résonance. Une façon physique de voir ce phénomène est de voir tout simplement que plus la fréquence augmente plus il est difficile de synchroniser l'arrivée de l'énergie de l'extérieur du système (considérée sinusoïdale) avec les variations de l'énergie interne.

Le fait que les résonances à  $\Omega = \omega_{mn}, 3\Omega = 2\omega_{mn}, \dots$  soient difficilement excitable ne veut pas dire que l'amplitude ne possèdera pas d'harmonique d'ordres supérieurs. En effet, si on regarde l'équation (6.82), la stabilité donnée par  $\mu$  est totalement indépendante du contenu harmonique donnée par  $P(T)$  ( $P(T)$  n'est autrement dit pas un sinus ou un cosinus pur)

Les modes de couplage d'ordre supérieur étant en pratique difficile à exciter, d'autant plus que les pertes stabiliseront encore plus le système, il conviendra donc de se concentrer sur les couplages de type sous-harmoniques et d'étudier le diagramme de stabilité pour les différentes fréquences propres du système.

Un diagramme dénormalisé comportant les 12 premiers modes dans notre cas d'étude est alors donnée par la figure 6.11.

Remarquons aussi que même pour des amplitudes faibles (voir figure 6.12), il existe un phénomène de compétition de mode. Le modèle physique explicité ici ne permet pas de déterminer si la dégénérescence sera levée et quel type de réponse aura le système.

### 6.3.3.2 Étude de l'influence de la dissipation

**Transformation de l'équation différentielle** Transformons encore une fois l'équation (6.79) dans une forme canonique, en reposant les mêmes transformations de variable que (6.73), soit :

$$\frac{d^2 a_{mn}}{dT^2} + 2r_{nm} \frac{da_{mn}}{dT} + [p_{mn} - 2q_{mn} \cos(2T)] a_{mn} = 0 \quad (6.83)$$

avec :

$$r_{nm} = \frac{2\zeta_{mn}}{\Omega} \quad (6.84)$$

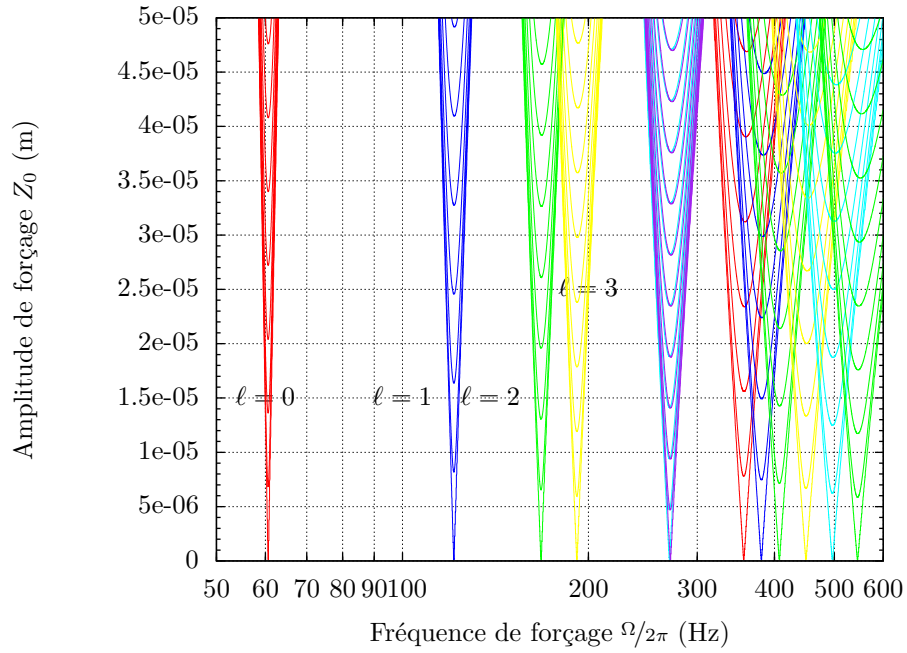


FIG. 6.11: Diagramme de stabilité des 12 premiers modes dans le cas où le fluide peut être modélisé par une équation de Mathieu dans un réservoir de 2.5 mm de rayon rempli de 5 mm d'eau. La surface libre sera animé d'un mouvement de pulsation  $\Omega/2$ . Les zones instables sont ombrées. Il peut être noté que le mode  $\ell = 4$  et  $\ell = 5$  sont quasiment confondus.

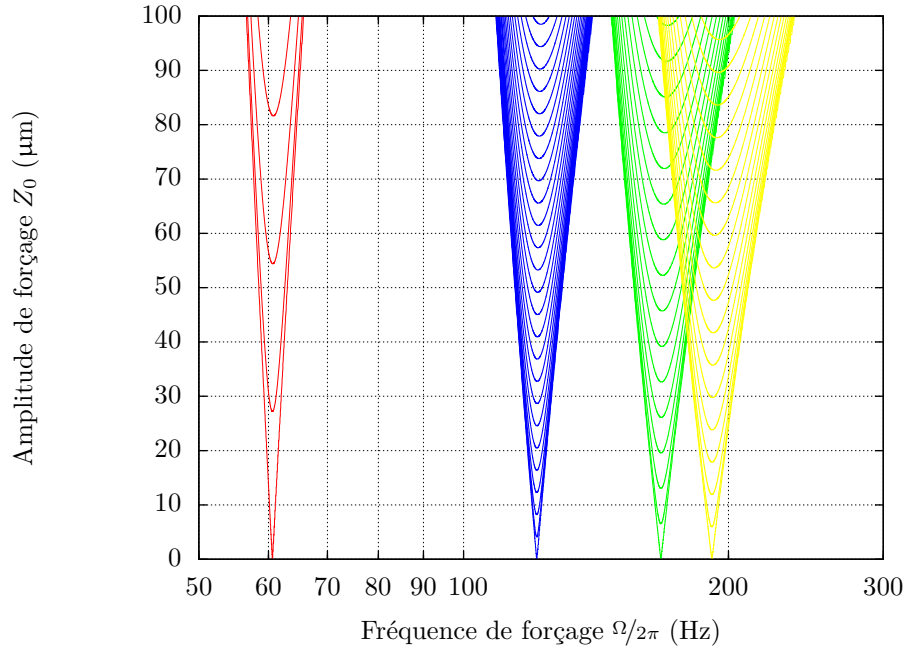


FIG. 6.12: Diagramme de stabilité des quatre premiers modes dans le cas où le fluide peut être modélisé par une équation de Mathieu dans un réservoir de 2.5 mm de rayon rempli de 5 mm d'eau. La surface libre sera animée d'un mouvement de pulsation  $\Omega/2$ . Les zones instables sont ombrées.

Soit en posant un changement de variable suivant par analogie aux pertes classiques :

$$a_{mn} = e^{-r_{nm}T} A_{mn} \quad (6.85)$$

Soit :

$$e^{-r_{nm}T} \frac{d^2 A_{mn}}{dT^2} + 2q_{mn} e^{-r_{nm}T} \cos(\Omega T) A_{mn} + p_{nm} e^{-r_{nm}T} A_{mn} - r_{nm}^2 e^{-r_{nm}T} A_{mn} = 0 \quad (6.86)$$

Il est alors possible de simplifier par  $\exp(-r_{nm}t)$  et de revenir à la forme classique de l'équation de Mathieu en posant<sup>①</sup> :

$$P_{nm} = p_{nm} - r_{nm} = \left( \frac{\omega'_{mn}}{\frac{\Omega}{2}} \right)^2 \quad Q_{mn} = q_{mn} \quad \omega_{mn}^{\prime 2} = \omega_{mn}^2 - \zeta_{mn}^2 \quad (6.87)$$

Soit l'équation classique de Mathieu :

$$\frac{d^2 A_{mn}}{dT^2} + [P_{nm} - 2Q_{mn} \cos(2T)] A_{mn} = 0 \quad (6.88)$$

Il est aussi possible d'exprimer  $r_{nm}$  en fonction de  $P_{nm}$  :

$$r_{nm} = \frac{2\zeta_{mn}}{\Omega} = \frac{\zeta_{mn}}{\omega'_{mn}} \sqrt{P_{nm}} \quad (6.89)$$

On peut donc appliquer le calcul du coefficient  $\mu$  de la section précédente, en notant néanmoins que la solution générale est alors maintenant :

$$A_{mn} = A_+ e^{(i\mu - r_{nm})T} P(T) + A_- e^{(-i\mu - r_{nm})T} P(-T) \quad (6.90)$$

L'instabilité ne peut maintenant se développer que si  $\Re(j\mu - r_{nm}) > 0$ . Il est alors possible de tracer des graphes de stabilité. Le diagramme de la figure 6.9 subira donc quelques modifications :

- Un décalage des langues d'instabilité sur l'axe des fréquences par un facteur  $\sqrt{1 - \zeta_{mn}^2/\omega_{mn}^2}$ . Pour les pertes faibles ce décalage sera négligeable.
- Une diminution des zones instables. En particulier, l'instabilité ne pourra exister pour des amplitudes arbitrairement petites.
- Les modes de résonance d'ordre supérieur à une fréquence donnée, seront plus atténués que les modes d'ordres inférieurs. Ces modes déjà défavorisés par la sélectivité en fréquence le seront encore plus à cause des pertes.

On a effectué ce travail pour plusieurs valeurs de facteurs de pertes sur la figure 6.13.

Il peut être démontré par une approche perturbative dans le cas des équations de Mathieu atténuée [25] que l'amplitude minimale afin d'être instable pour le cas  $r_{nm} - p_{mn} \ll 1$  est :

$$Q_{nm}^2 = (P_{mn} - 1)^2 + (2r_{nm})^2 \quad (6.91)$$

Soit un minimum en :

$$Q_{nm}^* = 2r_{nm} + o(r_{nm}) \quad (6.92)$$

En dénormalisant, nous trouvons alors l'amplitude minimale nécessaire sous les hypothèses précédentes :

$$Z^* \approx \frac{r_{nm}}{k_{mn} \tanh(k_{mn}h)} \approx \frac{\zeta_{mn}}{\omega_{mn} k_{mn} \tanh(k_{mn}h)} \quad (6.93)$$

Soit en arrangeant pour faire apparaître  $k_{mn}$  :

$$Z^* \approx \frac{\zeta_{mn}}{k_{mn}^{5/2} [\tanh(k_{mn}h)]^{3/2} \sqrt{\left( \frac{\sigma}{\rho} + \frac{g}{k_{mn}^2} \right)}} \quad (6.94)$$

Il apparaît donc sous l'hypothèse des faibles pertes, que travailler à des nombres d'ondes importants diminuera les pertes de manière sensible. Notons que si l'on néglige la capillarité ( $Bo \gg 1$ ) alors nous obtenons un résultat très différent  $Z^* \propto \sqrt{k_{mn}}$ .

<sup>①</sup>Notons que  $P_{nm}$  évolue maintenant sur l'intervalle  $[-r_{nm}, \infty]$

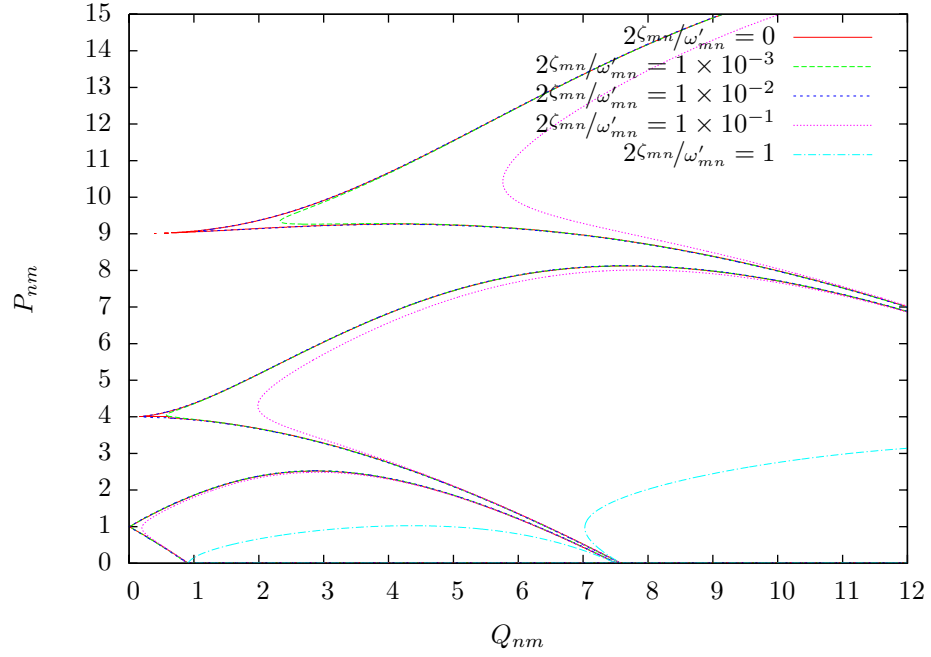


FIG. 6.13: Limite de stabilité de l'équation de Mathieu pour différentes valeurs de pertes. Calcul effectué à l'aide de [23].

mode	1	2	3	4	5	6	7
$r_{mn}(P_{nm} = 1) \times 10^{-2}$ sans capillarité	3	10	16	25	34	50	66
$r_{mn}(P_{nm} = 1) \times 10^{-2}$ avec capillarité	0.89	1.23	1.48	1.71	1.90	2.07	2.23

TAB. 6.2: Atténuation sans et avec capillarité pour un fluide de type eau de hauteur 5 mm dans un réservoir de 2.5 mm. Calcul effectué à l'aide de l'équation (6.89)

**Le modèle de Landau** Les calculs précédents n'ont permis que de modifier l'équation de Mathieu afin de tenir compte des pertes. Néanmoins le facteur de pertes  $\zeta_{mn}$  n'est point spécifié.

Une première approche consiste à calculer les pertes en utilisant l'approche de Landau [9, §25], soit :

$$\zeta_{mn} = 2\nu k_{mn}^2 \quad (6.95)$$

Un calcul récapitulant le facteur de pertes pour différents modes avec et sans capillarité a été effectué dans le tableau 6.2. On remarque alors que la capillarité diminue sensiblement le facteur de pertes volumique ce qui peut paraître surprenant. Une explication plus visuelle est donnée par la figure 6.14. On remarque alors que la capillarité évite aux pertes de diverger. La variation des fréquences propres dues aux pertes est comme prévue très faible (voir tableau 6.2).

mode ( $\ell$ )	0	1	2	3	4
mode ( $n, m$ )	(1, 0)	(2, 0)	(0, 0)	(3, 0)	(4, 0)
$f'_{mn}$ en Hz	30	61	84	96	135
Correction relative $ f'_{mp} - f_{mp} /f_{mp}$	$1.62 \times 10^{-5}$	$3.08 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-5}$	$4.41 \times 10^{-5}$	$5.67 \times 10^{-5}$

TAB. 6.3: Étude de l'influence des pertes sur les fréquences propres pour de l'eau de hauteur 5 mm dans un reservoir de 2.5 mm de rayon.  $f_{mp}$  est la fréquence propre dans le cas sans pertes,  $f'_{mp}$  avec pertes. L'influence est comme prévue négligeable.

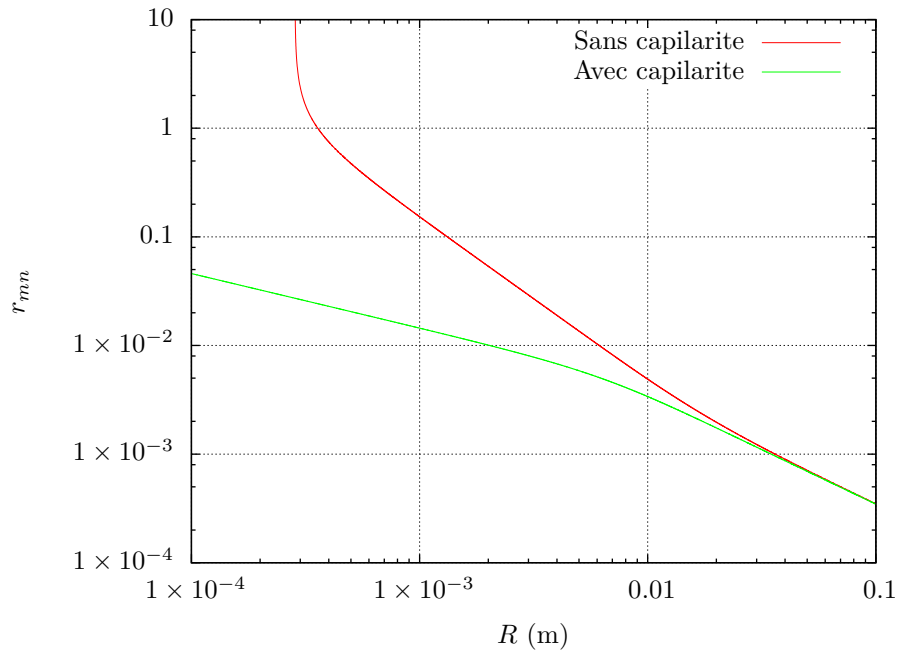


FIG. 6.14: Calcul de la dissipation en fonction du rayon du récipient pour le premier mode. L'apport de la capillarité est évident.

Soit dans le cas dissipatif classique en remplaçant  $r_{nm}$  par son expression en fonction de  $k_{mn}$  et en remarquant que dans le cas faible perte  $\omega'_{mn} \approx \omega_{mn}$  :

$$Z^* \approx \frac{2\nu}{\sqrt{k_{mn}} [\tanh(k_{mn}h)]^{3/2} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} + \frac{g}{k_{mn}^2}\right)}} \quad (6.96)$$

Notons que si l'on néglige la capillarité ( $\sigma/\rho \ll 1$ ) alors nous obtenons un résultat très différent  $Z^* \propto \sqrt{k_{mn}}$ . Les applications numériques sont données par le tableau 6.4.

mode ( $\ell$ )	0	1	2	3	4	5	6
$Z_{mn}^*$ ( $\mu\text{m}$ )	7.75	6.42	5.82	5.59	5.01	5.00	4.58

TAB. 6.4: Amplitude nécessaire pour exciter l'instabilité pour un fluide de type eau de hauteur 5 mm dans un réservoir de 2.5 mm de rayon à 20 °C.

La température jouera un rôle important. En effet la loi de  $\nu$  est une loi de type puissance en température; soit pour de l'eau [26] :

$$\nu\rho = A10^{\frac{B}{T-C}} = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{247.8}{T-140}} \quad (6.97)$$

$\sigma$  suit une loi de Eötvös [27] :

$$\sigma = 0.07275(1 - 0.002(T - 291)) \quad (6.98)$$

Le pire cas sera pour  $T = 0$  °C pour lequel  $Z^* = 10.0 \mu\text{m}$  dans le cas d'un réservoir de 2.5 mm de rayon, et rempli de 5 mm d'eau. La figure 6.15 récapitule l'influence de la température.

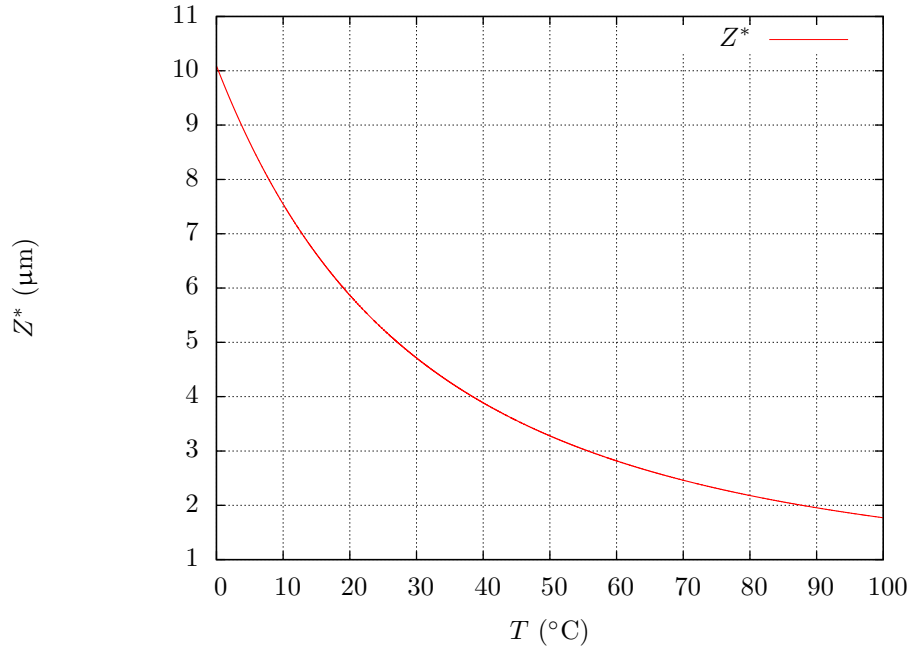


FIG. 6.15: Influence de la température sur l'amplitude minimale d'instabilité. Réservoir de 2.5 mm de rayon, et rempli de 5 mm d'eau. Courbe pour le premier mode.

Il est possible maintenant de tracer les diagrammes de modes pour une température de 20 °C. À titre de comparaison le diagramme de stabilité des quatre premiers modes a été tracé dans le cas sans pertes et dans le cas avec pertes sur la figure 6.16.

Malheureusement les fréquences obtenues ne collent pas avec celles de l'expérience. Il nous faut donc utiliser les modes linéaires correspondants au cas où la vitesse est nulle au bord.

### 6.3.4 Utilisation du modèle linéaire

Il est possible d'utiliser les résultats du modèle de Kidambi, en remplaçant  $\omega_{mn}$  par la valeur trouvée dans le cas linéaire dans l'équation (6.75). Le raisonnement physique est conservé car le



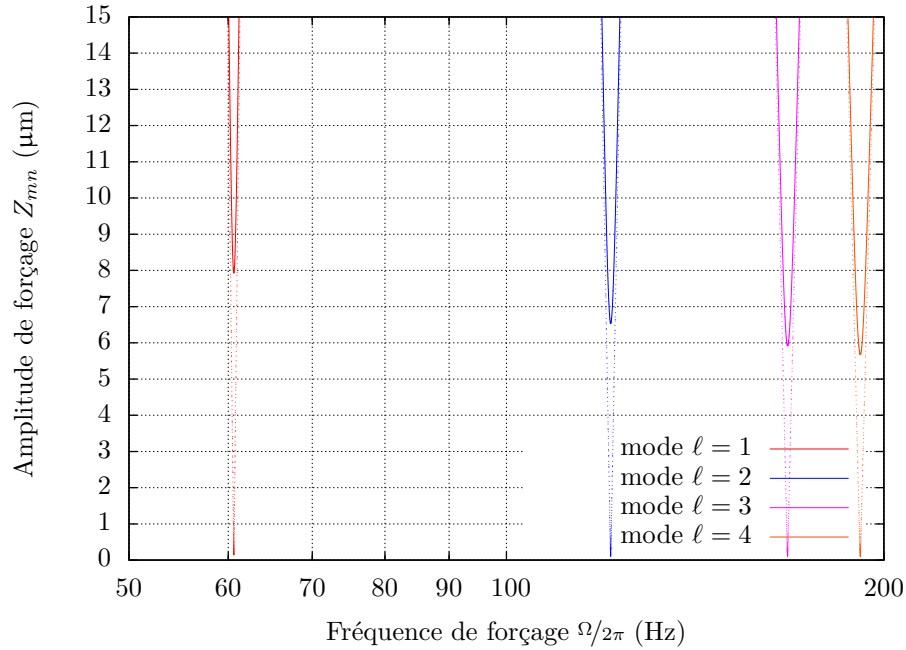


FIG. 6.16: Diagramme de stabilité des quatre premiers modes dans le cas où le fluide peut être modélisé par une équation de Mathieu en tenant compte de pertes de type Landau dans un réservoir de 2.5 mm de rayon remplis de 5 mm d'eau. La surface libre sera animée d'un mouvement de pulsation  $\Omega/2$ . La frontière de la zone instable est tracée en trait plein. Les anciens domaines de stabilité sont indiqués par des pointillés.

mode de Faraday est décrit en injectant le mode linéaire dans l'équation de la surface libre ce qui donne alors l'équation de MATHIEU. On obtient alors la courbe de stabilité pour le mode  $\ell = 1$  donné par la figure 6.17. Cette solution est alors plus proche de l'expérimental.

### 6.3.5 Vers un modèle plus complet

L'utilisation du modèle de Kidambi s'est limité à réutiliser les fréquences du mode linéaire dans l'équation de MATHIEU. Cette méthode bien que simple et donnant des résultats expérimentaux corrects n'est pas totalement complète. Il semble être possible d'utiliser le modèle de Kidambi afin de dériver l'onde de Faraday en effectuant quelques modifications. Bien que les équations du modèle soient quasiment identiques au cas linéaire (ils s'expriment de manière linéaire dans le domaine de Laplace), l'équation décrivant la surface libre est alors très fortement non linéaire (elle couple les modes entre eux) et nécessite alors un traitement particulier. Il est possible qu'une approche de type harmonic-balance en traitant dans le domaine temporel l'équation de la surface libre et les autres équations dans le domaine de Laplace (et modal) puisse donner des résultats intéressants.

## 6.4 Cas d'un réservoir entièrement rempli de fluide

Si le réservoir est entièrement rempli de fluide, la surface libre n'existe pas et l'onde de Faraday n'existe pas. Ce cas peut donc poser en théorie des problèmes à notre méthode de détection. En pratique néanmoins deux phénomènes font qu'il est possible de détecter des sous harmoniques :

- Les cellules ne sont jamais pleines. L'eau en gelant peut détruire les murs des cellules lorsqu'elles atteignent un taux de remplissage d'environ 90% (la glace à une densité de  $0.917 \text{ kg/m}^3$ ).

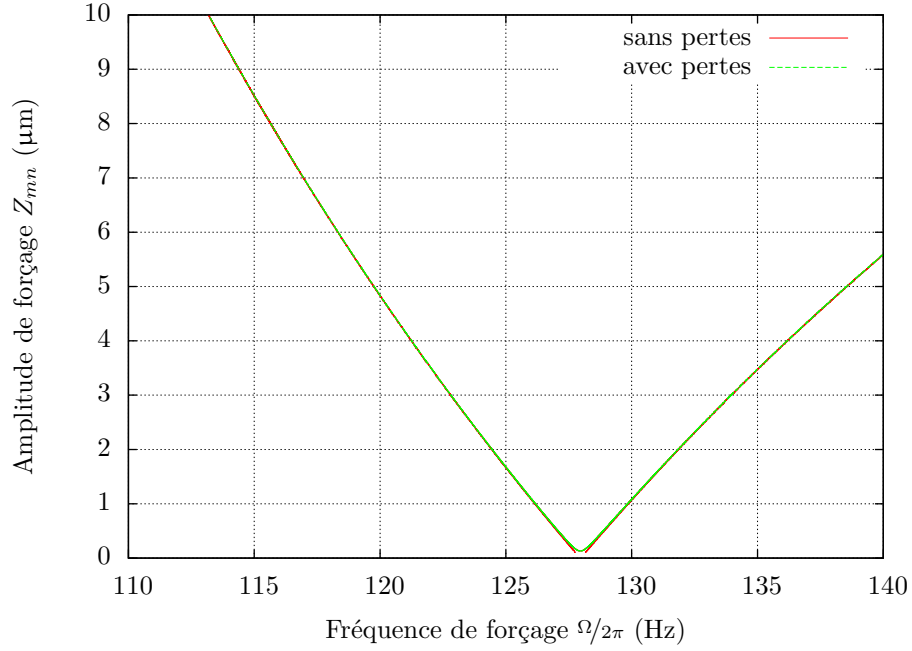


FIG. 6.17: Diagramme de stabilité du mode  $\ell = 1$  en utilisant les résultats du cas linéaire.

– Dans le cas où l’eau n’a pas encore gelé, les murs de la cellule étant souples peuvent rentrer en résonance paramétrique avec l’eau, générant ainsi des sous harmoniques [8]. Le deuxième cas étant en pratique exceptionnel dans notre cas, nous renverrons donc les lecteurs curieux à la littérature.

## 6.5 Simulation

La simulation du phénomène de Faraday est délicate. En premier lieu car c’est un phénomène non linéaire, ce qui en lui-même rend la simulation moins aisée. En outre, cette non linéarité étant de type sous harmonique, elle introduit en elle-même des difficultés.

Au point de vue hydraulique, il est nécessaire comme nous le verrons dans la suite de cette section de tenir compte de l’effet des forces de surface. L’absence de la tension de surface dans la modélisation se traduisant par une croissance non bornée de l’instabilité. Cependant, tenir compte des forces de surface n’est pas une mince affaire et plusieurs formulations numériques sont possibles chacune apportant son lot de problèmes et d’avantages. A titre d’exemple, les forces au niveau de la surface peuvent être données par :

- $\vec{f}_\sigma = a_i \sigma \kappa \vec{n}_i$  pour le code TURBIT-VOF, où  $a_i$  est la concentration volumique d’aire interfaciale,  $\sigma$  la tension superficielle,  $\kappa = -\vec{\nabla} \cdot \vec{n}_i$  est deux fois la moyenne de la courbure à l’interface, et  $\vec{n}_i$  est le vecteur normal à la surface [28].
- $\|\vec{f}_\sigma\| = \sigma \kappa'$  pour le code STARCD, avec  $\alpha_L$  le taux de remplissage de la cellule numérique et  $\kappa' = -\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{\nabla} \alpha_L}{\|\vec{\nabla} \alpha_L\|} \right)$  [29].
- $\vec{f}_\sigma = \sigma \kappa \vec{n}_i \|\vec{\nabla} \alpha_L\|$  pour le code CFX [30].
- $\vec{f}_\sigma = \frac{\rho_m \sigma \kappa' \vec{\nabla} \alpha_L}{\frac{1}{2}(\rho_g + \rho_l)}$  pour le code FLUENT, avec  $\rho_m$  la densité moyenne,  $\rho_g$  la densité du gaz,  $\rho_l$  la densité du liquide [31]

D’autres problèmes numériques peuvent aussi se présenter lors de la reconstruction de la surface libre. Deux approches sont possibles, une approche utilisant une équation différentielle pour suivre la surface, et une approche basée sur une reconstruction géométrique à chaque pas de temps. Sur

des cas simples la différences entre les deux approches peut être de l'ordre de 20% sur les vitesses au niveau de la surface libre [32].

De plus, il convient de remarquer que peu de codes de calcul sont suffisamment souples pour permettre de rendre la gravité non constante. Ce qui complique d'autant plus le choix des logiciels de simulation.

Il convient de signaler que ce dernier critère est beaucoup plus impératif que les précédents. En effet, nous n'obtiendrons que des résultats qualitatifs par simulation car :

- La mesure de l'angle triple dans la cellule ne peut être connue de manière certaine. Il est délicat de réaliser ce genre de mesure pour un matériau plan classique [33] et devient affreusement délicate dans notre cas de matériaux réels.
- Il existe des variations importantes de fabrication à l'intérieur d'un composite, le comportement capillaire de l'eau sera donc différent à l'intérieur d'un même composite.
- Notre méthode doit s'appliquer à tous les types de composites cellulaires et non à un type particulier et bien défini.

### 6.5.1 Simulation complète avec star-ccm+

Une première approche de simulation a été tentée avec le logiciel COMSOL [34]. Néanmoins, les simulations n'étaient pas satisfaisantes et dépassaient les capacités mémoire de nos machines<sup>①</sup>. Il a donc été décidé de se replier vers le logiciel star-ccm++.

Le logiciel star-ccm++ [35] est un logiciel de mécanique des fluides générique permettant de résoudre un très grand nombre de problèmes de mécanique des fluides. Le grand avantage de ce logiciel est son moteur de script permettant en utilisant du code java de modifier les paramètres de simulations de manière souple. Avantage non négligeable de ce logiciel, il permet d'effectuer des simulations en axisymétrique, limitant ainsi la charge de calcul. Il résout les équations de la mécanique des fluides suivant une méthode de type volumes finis avec un maillage fixe.

Les temps caractéristiques de la capillarité sont de l'ordre de la 1  $\mu$ s. Il est d'ailleurs possible de le montrer numériquement : la surface est quasiment stable au bout de  $1 \times 10^{-4}$  s en partant de la condition de surface plane (non physique). Le pas de calcul sera donc pris de l'ordre de 1  $\mu$ s.

Nous avons effectué une simulation d'un tube de 7 mm de hauteur et de 1 mm de rayon, rempli de 5 mm d'eau liquide. Le maillage est donné par la figure 6.18. La position de la surface libre fut calculé en utilisant la position de la dernière cellule le long de la verticale telle que  $V_f > 0.5$ , avec  $V_f$  le volume de fluide. La résolution de cette reconstruction est donc limité à la taille de la cellule ce qui apparaît lors du calcul (voir figure 6.18). Néanmoins ce n'est pas en pratique un problème car le maillage est suffisamment fin (dans notre cas de maillage 25  $\mu$ m au niveau de l'interface), et que le gain de forçage est important. Le maillage est beaucoup plus limitant au point de vue de l'amplitude de forçage, il faut s'assurer que le forçage sera d'amplitude supérieure à la taille d'une cellule, afin de réellement moduler la surface lors du démarrage de l'onde. Néanmoins pour des questions d'efficacité de calcul, il n'est pas possible d'avoir des tailles de mailles trop petites (un calcul avec des tailles raisonnables pouvant durer plus d'une semaine). Les conditions aux limites sont de type glissantes, ce qui encore une fois ne tient pas compte de tous les phénomènes physiques.

Après simulation en tenant compte que l'angle au niveau de la ligne triple est de 70 °, valeur usuelle observée sur le carbone on obtient les résultats de la simulation correspondants bien à une onde sous-harmonique (voir figure 6.19).

### 6.5.2 Conclusion et perspectives

La simulation par un code générique donne des résultats consistants avec la théorie analytique. Néanmoins, le calcul est très lent et ne permet pas pour des raisons pratiques de tracer un diagramme de stabilité.

---

<sup>①</sup>La licence de ce logiciel a été aussi annulée en cours de thèse car non économiquement viable. Sa non sélection pour des critères techniques a donc été un choix heureux.

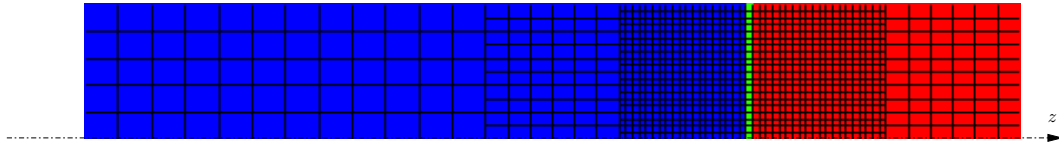


FIG. 6.18: Maillage axisymétrique d'un tube de 1 mm de rayon rempli par 5 mm d'eau.

Il conviendra aussi de tester de nouveaux codes de calcul, en particulier le code de calcul maison de l'IMFT JADIM [36].

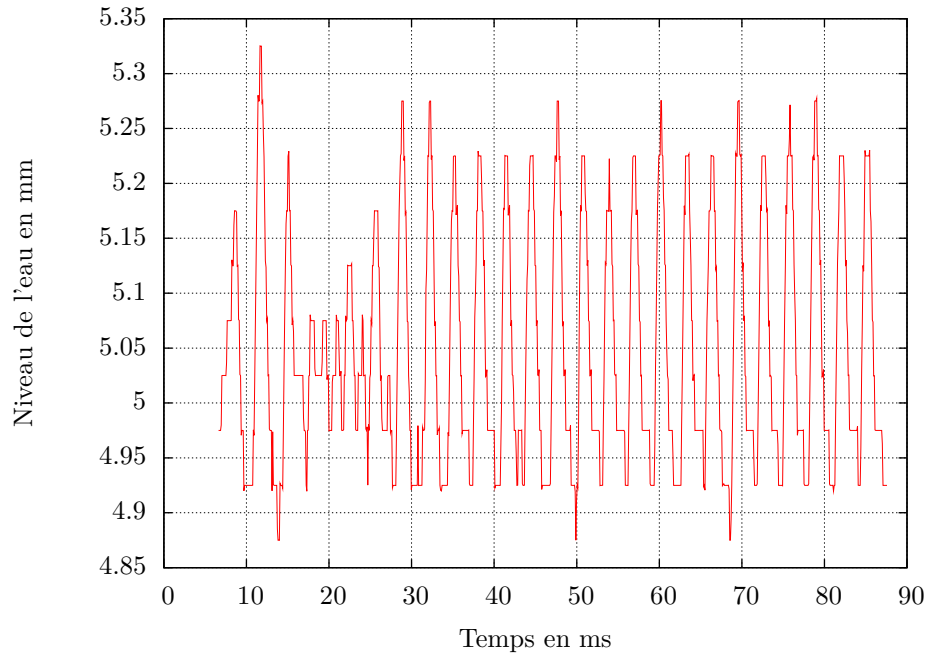
## 6.6 Conclusion

Les modèles hydrauliques présentés dans cette section permettent de mieux appréhender le phénomène physique fondamental à la base de notre dispositif : l'onde de Faraday. Cette étude ouvre un vaste champ de recherche en mécanique des fluides.

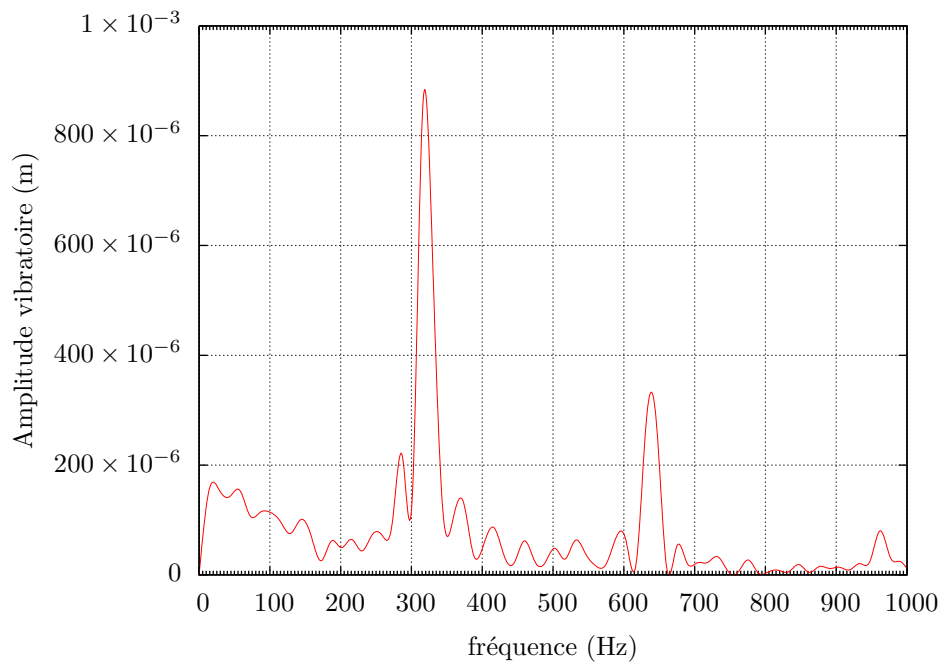
Dans le cadre de notre dispositif nous devons retenir que les conditions aux limites, et la tension de surface jouent un rôle prépondérant sur la fréquence de résonance de l'onde de Faraday. Un dispositif mécanique agile en fréquence nous semble donc être la clef du succès de notre dispositif.

## 6.7 Bibliographie

- [1] Michel FARADAY. « On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surface ». Anglais. Dans : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 121 (mai 1831), p. 299–340. DOI : 10.1098/rstl.1831.0018. Cf. p. 93, 107.
- [2] LORD RAYLEIGH. « On maintained vibrations ». Anglais. Dans : *Philosophical magazine* 15 (1883), p. 220–235. ISSN : 1478-6435. Cf. p. 93, 94, 107.
- [3] LORD RAYLEIGH. « On the crispations of fluid resting upon a vibrating support ». Anglais. Dans : *Philosophical magazine* 16 (1883), p. 50–58. ISSN : 1478-6435. Cf. p. 93, 107.
- [4] T. B. BENJAMIN et F. URSELL. « The Stability of the Plane Free Surface of a Liquid in Vertical Periodic Motion ». Anglais. Dans : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 225 (sept. 1954), p. 505–515. ISSN : 1364-5021. DOI : 10.1098/rspa.1954.0218. Cf. p. 94, 108.
- [5] Johann M. SCHLEIER-SMITH. « Robotic manipulation system utilizing fluidic patterning ». Anglais. Brev. américain 6776118. THE MITRE CORPORATION. 17 août 2004. Cf. p. 94.
- [6] Johann M. SCHLEIER-SMITH. « Method of robotic manipulation using fluidic patterning ». Anglais. Brev. américain 6786174. THE MITRE CORPORATION. 7 sept. 2004. Cf. p. 94.
- [7] Doug BINKS et Willem VAN DE WATER. « Nonlinear Pattern Formation of Faraday Waves ». Dans : *Physical Review Letters* 78.21 (1997), p. 4043–4046. ISSN : 0031-9007. DOI : 10.1103/PhysRevLett.78.4043. Cf. p. 94.
- [8] Raouf A. IBRAHIM. *Liquid Sloshing Dynamics. Theory and applications*. Anglais. Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press, 2005. ISBN : 0-521-83885-1. Cf. p. 94, 99, 117.
- [9] L. D. LANDAU et E. M. LIFCHITZ. « Fluid Mechanics ». Dans : *Course of Theoretical Physics*. 2<sup>e</sup> éd. T. 6. Oxford, UK 1987. ISBN : 0-08-033933-6. Cf. p. 97, 114.
- [10] Rangachari KIDAMBI. « Meniscus effects on the frequency and damping of capillary-gravity waves in a brimful circular cylinder ». Anglais. Dans : *Wave Motion* 46.2 (mar. 2009), p. 144–154. ISSN : Wave Motion. DOI : 10.1016/j.wavemoti.2008.10.001. Cf. p. 99, 101.



(a) Niveau de l'eau au niveau de la ligne triple.



(b) Spectrogramme de l'amplitude vibratoire de la surface libre au niveau de la ligne triple. Élimination du régime transitoire ( $t < 4 \times 10^{-2}$  s), fenêtrage de Hamming.

FIG. 6.19: Simulation d'un reservoir de 1 mm de rayon rempli de 5 mm d'eau excité par un forçage vertical sinusoïdal de  $1 \times 10^{-5}$  m à 640 Hz.

- [11] Philip M. MORSE et H. FESHBACH. *Methods of theoretical physics*. Anglais. .II. New York : McGraw Hill, 1953. Cf. p. 100.
- [12] H. P. W. GOTTLIEB. « On the general solution of the vector Helmholtz equation in cylindrical polar coordinates ». Dans : *Journal of the Acoustical Society of America* 81.5 (mai 1987), p. 1628–1629. ISSN : 0001-4966. DOI : 10.1121/1.394516. Cf. p. 100.
- [13] D. E. AMOS. « A Portable Package for Bessel Functions of a Complex Argument and Non-negative order ». Dans : *ACM Transactions on Mathematical Software* 12.3 (sept. 1986), p. 265–273. ISSN : 0098-3500. DOI : 10.1145/7921.214331. Cf. p. 101.
- [14] G. N. WATSON. *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*. Anglais. 2<sup>e</sup> éd. Cambridge, England : At the University press, 1944. Cf. p. 102–104.
- [15] C. B. MOLER et G. W. STEWART. « An Algorithm for Generalized Matrix Eigenvalue Problems ». Dans : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 10.2 (avr. 1972), p. 241–256. ISSN : 0036-1429. Cf. p. 103.
- [16] Burton S. GARROW. « Algorithm 535 : The QZ algorithm to solve the generalized eigenvalue problem for complex matrices [F2] ». Dans : *ACM Transactions on Mathematical Software* 4.4 (avr. 1978), p. 404–410. ISSN : ACM Transactions on Mathematical Software. DOI : 10.1145/356502.356500. Cf. p. 103.
- [17] Dr Ludwig MATTHIESSEN. « Akustische Versuche, die kleinsten Transversalwellen der Flüssigkeiten betreffend ». Dans : *Annalen der Physik* 210.5 (1868). , p. 107–117. ISSN : 0003-3804. DOI : 10.1002/andp.18682100506. Cf. p. 107.
- [18] Émile MATHIEU. « Mémoire sur le mouvement vibratoire d’une membrane de forme elliptique ». Dans : *Journal de mathématiques pures et appliquées* 13.2 (1868), p. 137–203. ISSN : 0021-7824. Cf. p. 107.
- [19] Milton ABRAMOWITZ et Irene A. STEGUN. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Anglais. ninth Dover printing, tenth GPO printing. New York 1964. ISBN : 0-486-61272-4. URL : <http://www.math.sfu.ca/~cbm/aands/> (visité le 01/10/2007). Cf. p. 109.
- [20] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Floquet’s theorem*. 2007. URL : [http://en.wikipedia.org/wiki/Floquet’s\\_theorem](http://en.wikipedia.org/wiki/Floquet's_theorem) (visité le 03/01/2008). Cf. p. 109.
- [21] N.W. McLACHLAN. *Theory and applications of Mathieu functions*. Anglais. 2<sup>e</sup> éd. New York 1964. Cf. p. 109.
- [22] Jan Eric STRÄNG. « On the characteristic exponents of Floquet solutions to the Mathieu equation ». Dans : *Académie Royale de Belgique. Mémoires de la Classe des Sciences* 6 (2005), p. 16. Cf. p. 109.
- [23] Timothy JONES. *Mathieu’s Equations and the Ideal rf-Paul Trap*. Rap. tech. Philadelphia, PA, USA : Drexel University, 2006. URL : <http://www.physics.drexel.edu/~tim/open/mat/mat.pdf>. Cf. p. 109, 113.
- [24] FAYEZ A. ALHARGAN. « Algorithm 855 : Subroutines for the computation of Mathieu characteristic numbers and their general orders ». Anglais. Dans : *ACM Transactions on Mathematical Software* 32.3 (sept. 2006), p. 472–484. ISSN : 0098-3500. DOI : 10.1145/1163641.1163646. Cf. p. 109.
- [25] James H. TAYLOR et Kumpati S. NARENDRA. « Stability Regions for the Damped Mathieu Equation ». Anglais. Dans : *SIAM Journal on Applied Mathematics* 17.2 (fév. 1969), p. 343–352. ISSN : 0036-1399. DOI : 10.1137/0117033. Cf. p. 112.
- [26] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Viscosity*. 2009. URL : <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Viscosity> (visité le 26/02/2009). Cf. p. 115.
- [27] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Eötvös rule*. 2009. URL : [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eötvös\\_rule](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eötvös_rule) (visité le 17/02/2009). Cf. p. 115.
- [28] Martin WÖRNER. *A Compact Introduction to the Numerical Modeling of Multiphase Flows*. Rap. tech. FZKA 6932. Karlsruhe : Institut für Reaktorsicherheit, 2003. Cf. p. 117.

- [29] CD-ADAPCO. *STARCD user manual*. CD-adapco. Melville, New York 2008. Cf. p. 117.
- [30] ANSYS INC. *ANSYS CFX user manual*. ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA 2008. Cf. p. 117.
- [31] FLUENT INC. *Fluent user manual*. Fluent Inc. Hanover, NH, USA 2008. Cf. p. 117.
- [32] Furkan ÖZKAN et al. « Critical evaluation of CFD codes for interfacial simulation of bubble-train flow in a narrow channel ». Anglais. Dans : *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 55.6 (2007), p. 537–564. ISSN : 0271-2091. DOI : 10.1002/flid.1468. Cf. p. 118.
- [33] Pierre-Gilles DE GENNES, Françoise BROCHARD-WYART et David QUÉRÉ. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. 2<sup>e</sup> éd. Paris, France : Belin, 2004. ISBN : 2-7011-4055-2. Cf. p. 118.
- [34] COMSOL LAB. *Comsol multiphysics 3*. Comsol AB, 2009. Cf. p. 118.
- [35] CD-ADAPCO, éd. *Star-ccm+ manual*. 3.04.008. cd-adapco. 2008. Cf. p. 118.
- [36] IMFT. *Les moyens scientifiques et techniques*. 2007. URL : <http://www.imft.fr/recherche/eec/moyens2.html> (visité le 01/07/2009). Cf. p. 119.

# Chapitre 7

## Expérimentations

### Table des matières

7.1	Introduction . . . . .	123
7.2	Le RADAR . . . . .	123
7.2.1	Atténuation des ondes électromagnétique dans le carbone . . . . .	123
7.2.2	Test de sensibilité du radar . . . . .	125
7.2.3	Conclusion et améliorations . . . . .	125
7.3	Le système mécanique . . . . .	125
7.4	Le système hydraulique . . . . .	127
7.5	Le système de détection . . . . .	129
7.5.1	Expérimentations sur un tube cylindrique . . . . .	129
7.5.2	Expérimentation sur un modèle avec du carbone . . . . .	129
7.5.3	Conclusion et perspectives . . . . .	129
7.6	Conclusion . . . . .	131

### 7.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de fournir les résultats expérimentaux concernant l'étude de faisabilité et l'étude théorique des ondes de Faraday. Ce chapitre est décomposé en quatre sections :

- Une première section permettant de bien vérifier la sensibilité du RADAR. Nous nous attacherons en particulier à démontrer que le RADAR est tout à fait apte à détecter de faibles mouvements et ce même au travers du carbone.
- Une deuxième partie visant à vérifier que la structure mécanique sèche ne génère pas de sous-harmoniques et qu'ainsi la présence de la sous-harmonique signifie la présence d'eau dans la structure.
- Une troisième partie vérifiant quelques résultats sur les ondes linéaires dans les petits réservoir. Nous utiliserons en particulier une caméra rapide afin de visualiser les motifs d'ondes.
- Une quatrième partie validant le dispositif total. Nous détaillerons en particulier les résultats concernant un modèle simplifié, avant de passer au cas d'une maquette de laboratoire.

Enfin nous conclurons et nous ouvrirons quelques perspectives, en particulier sur les techniques expérimentales.

### 7.2 Le RADAR

#### 7.2.1 Atténuation des ondes électromagnétique dans le carbone

Une des difficultés identifiées de notre dispositif est l'atténuation de l'onde électromagnétique à cause du carbone. Afin de quantifier ces pertes, un dispositif expérimental simple a été mis en oeuvre. Il consiste à effectuer une mesure de propagation entre deux petites boucles avec et



sans carbone et à effectuer la différence entre les deux mesures (voir la photographie 7.1). Ainsi la contribution du carbone à l'atténuation est déterminée. Cette méthode est à rapprocher de la méthode de mesure en espace libre détaillée au niveau de la section 4.2.2 page 46. Cependant, ici, nous ne sommes pas directement intéressés par les paramètres primaires ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ), mais uniquement par les caractéristiques de propagation au travers du carbone. De plus, une mesure qualitative est amplement suffisante ; en effet, l'état de surface du carbone est très rugueux et assez aléatoire ce qui provoquera une dispersion de la mesure. En outre, il ne nous est pas possible de moyenner ces résultats, n'ayant pas assez d'échantillons à notre disposition. Néanmoins, comme précisé dans l'étude de faisabilité seul un ordre de grandeur compte étant donné que nous ne maîtrisons pas le type de matériaux carbone qui est disposé sur les avions.

La mesure pour une plaque de peau de composite carbone  $0^\circ/90^\circ$  est donnée par la figure 7.3. On remarque que les pertes pour les fréquences utilisées aux alentours de 2.5 GHz est de 15 dB ce qui ne gênera pas outre mesure notre radar. Les oscillations lors de la mesure sont dues à la longueur de la ligne coaxiale au delà du plan de calibration. La mesure en dessous de 1 GHz est non significative, la dimension de la plaque étant proche de la résonance.

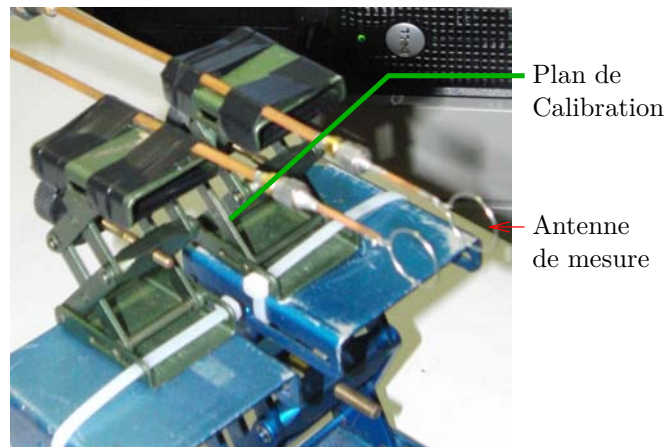


FIG. 7.1: Photographie du dispositif de mesure de l'atténuation de la peau carbone. Dispositif à vide.



FIG. 7.2: Photographie du dispositif de mesure de l'atténuation de la peau carbone. Dispositif avec la peau de carbone en place.

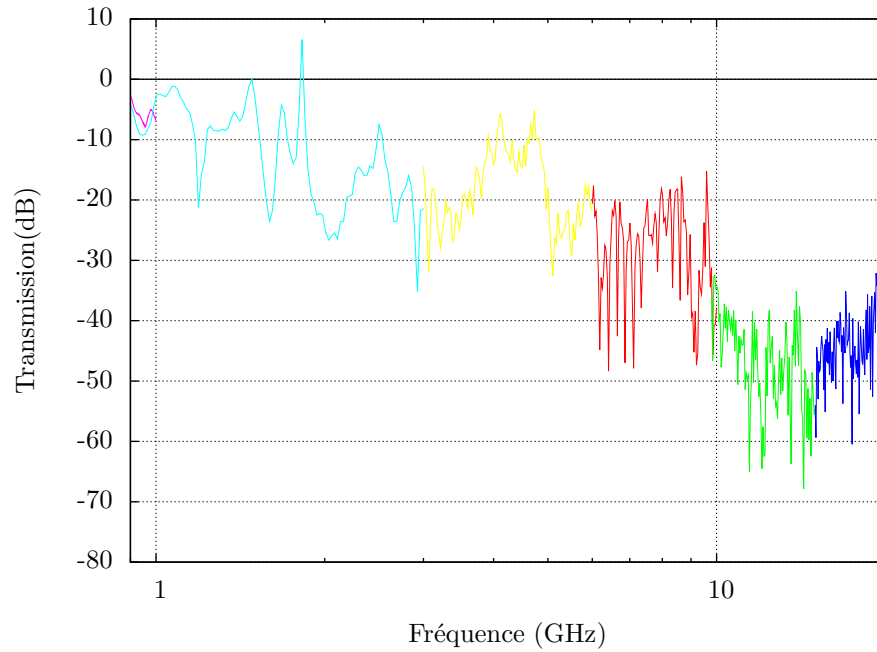


FIG. 7.3: Mesure de l'atténuation due au carbone. Les différentes couleurs correspondent à différentes boucles.

### 7.2.2 Test de sensibilité du radar

Afin de tester la sensibilité du radar, un test simple a été mis au point. Il consiste à détecter la vibration d'un diapason à l'aide d'un RADAR au travers d'une plaque de composite carbone. Les résultats dans le domaine temporel du test sont donnés par la figure 7.4. La sensibilité du RADAR est ainsi très satisfaisante, détectant la présence du diapason malgré des pertes deux fois plus importantes que dans les cas réels (en effet le composite est composé de deux plaques en carbone).

### 7.2.3 Conclusion et améliorations

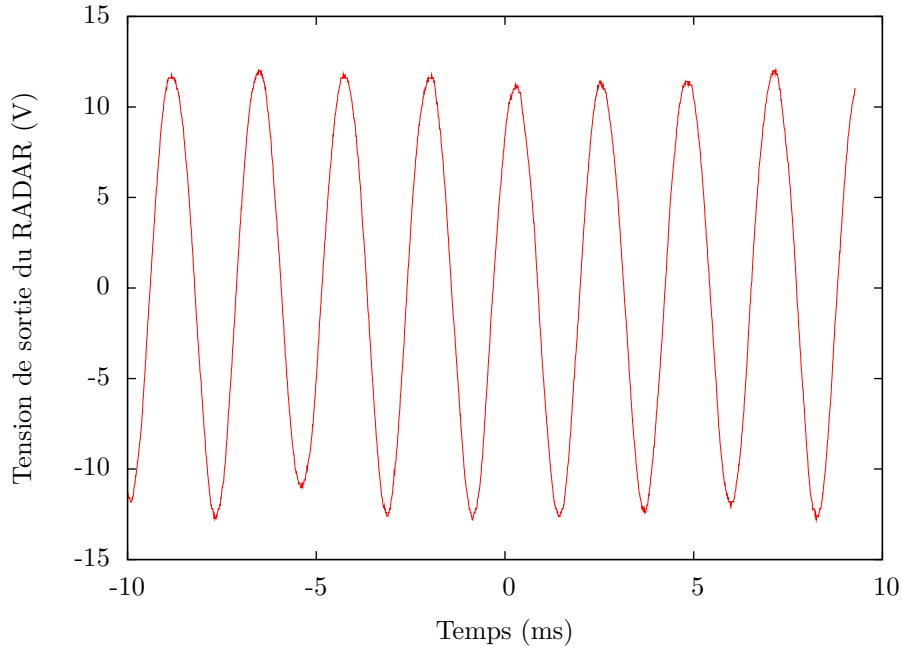
Les deux mesures précédentes démontrent que le procédé de mesure utilisant un radar est viable pour mesurer de faibles oscillations même au travers d'une plaque carbone. La mesure d'atténuation au travers du carbone est amplement améliorable en particulier au travers d'une campagne de mesure sur un grand nombre d'échantillons. Il conviendra aussi d'effectuer des mesures en guide coaxial pour les fréquences inférieures à 1 GHz.

## 7.3 Le système mécanique

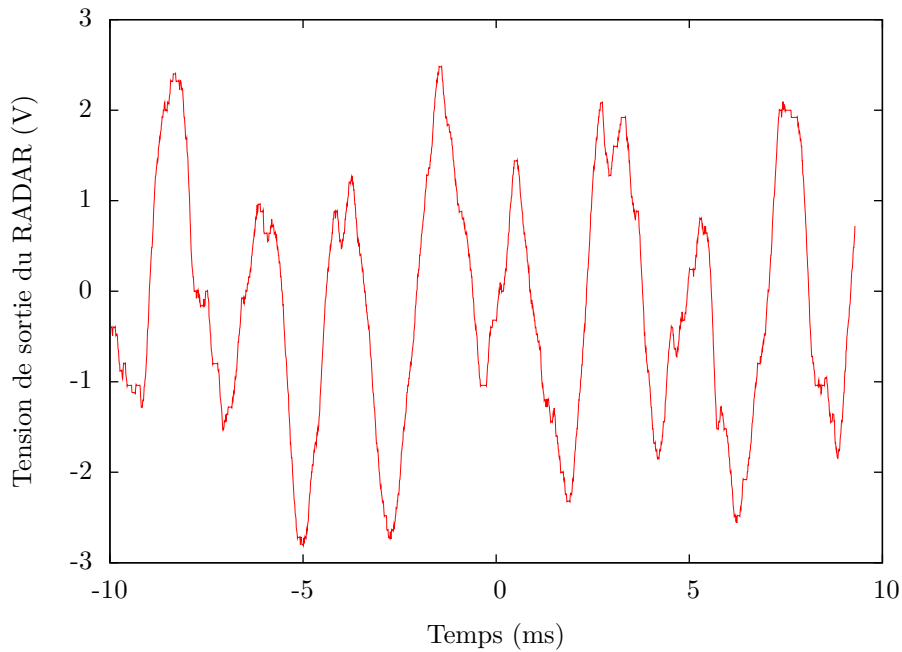
Le système mécanique a été testé pour vérifier s'il est capable de générer des sous harmoniques à sec. À cet effet un dispositif expérimental, explicité sur la figure 7.5, a été mis au point ; il consiste à mettre en vibration une plaque de carbone encastrée et à mesurer la réponse vibratoire de la plaque à l'aide d'un interféromètre Laser. Afin d'éviter tout problème de contact hertzien (rebond), le vibreur est mis en précontrainte par une presse hydraulique.

L'évolution temporelle de la position de la surface est mesurée par le laser à une distance de 10 cm de l'application de l'excitation vibratoire. L'excitation vibratoire est réglée de telle sorte que l'amplitude mesurée soit de 400  $\mu\text{m}$  crête à crête. L'amplitude de la sous-harmonique est calculée à partir d'une méthode de type cross corrélation.

Les résultats de mesure sont donnés par la figure 7.6. Le niveau de sous harmonique présent est au maximum de 25 dB, pour des niveaux d'excitation vibratoire amplement supérieurs à ceux



(a) Témoin (sans carbone)



(b) En présence de carbone

FIG. 7.4: Signal temporel associé à la vibration d'un diapason. Une plaque de carbone est interposée entre le diapason et le RADAR. On remarque encore bien le 440 Hz malgré le bruit important. L'atténuation est deux fois plus importante que dans notre cas d'étude.

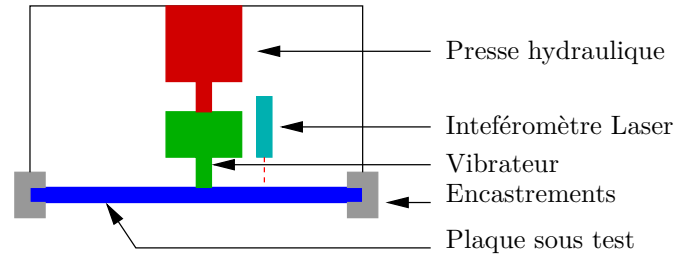
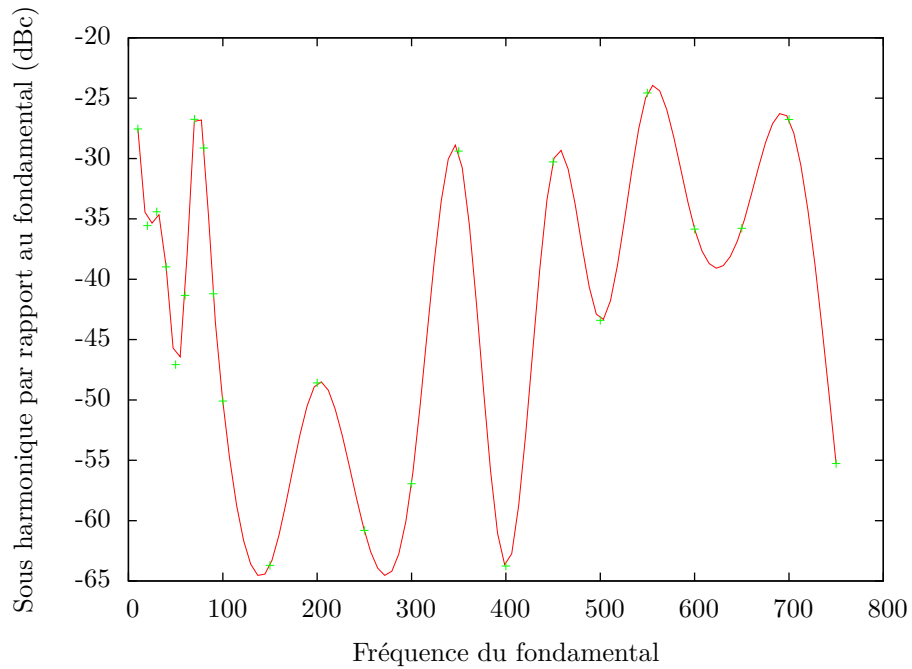


FIG. 7.5: Dispositif expérimental pour le test des sous harmoniques sur matériau sain

utilisés en pratique pour notre dispositif. En pratique ce niveau de sous harmonique est situé dans le bruit de mesure lié, en particulier, à la sensibilité de l'oscilloscope et du laser<sup>①</sup>.

FIG. 7.6: Niveau de la sous harmonique  $1/2$  par rapport au fondamental (dBc) en fonction de la fréquence d'excitation.

Nous pouvons donc conclure que le matériau sain ne génère pas expérimentalement de sous harmoniques.

## 7.4 Le système hydraulique

Afin de vérifier le cas linéaire nous avons créé un dispositif expérimental simple. Un pot vibrant met en vibration un cylindre rempli de liquide qui est filmé par une caméra rapide (pouvant réaliser des films jusqu'à 1000 images par seconde). Pour des raisons de reproductibilité des résultats le cylindre est une seringue à insuline modifiée (de 2.5 mm de rayon) qui est translucide et permet ainsi de filmer la surface libre. Le dispositif expérimental complet est reproduit sur la figure 7.7.

<sup>①</sup>Le problème de sensibilité au niveau de l'oscilloscope peut être résolu à l'aide d'un filtrage et d'un traitement du signal plus poussé. Malheureusement le laser utilisé ne donne pas accès directement à la mesure brute mais à une mesure déjà prétraitée, interdisant ainsi toute amélioration de ses caractéristiques.



FIG. 7.7: Photo du premier mode linéaire

Un des problèmes expérimentaux rencontré fût que les seringues sont traitées avec du Téflon afin que les liquides n'accrochent pas et ainsi permettent un meilleur écoulement lors de l'injection. Malheureusement il ne fut pas possible de retrouver les fréquences de résonances ni du cas glissement libre, ni du cas où l'écoulement est nul au bord. Après un ponçage minutieux de la surface latérale, il fut alors possible de retrouver facilement les fréquences du cas sans glissement. En particulier la fréquence du premier mode est bien 63.5 Hz à la place de 64 Hz de la théorie de Kidambi. Une photo du premier mode est disponible sur la figure 7.8.

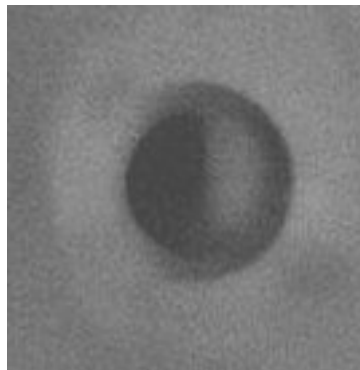


FIG. 7.8: Premier mode linéaire à 63.5 Hz dans le cas d'un réservoir poncé de rayon 2.5 mm rempli de 5 mm d'eau. Photo extraite d'un film à 250 images par seconde à la résolution maximale.

Dans le cas où le réservoir est non poncé nous trouvons une fréquence de résonance pour le premier mode de 42 Hz qui est situé entre la fréquence théorique pour les murs glissants et les murs non glissants<sup>①</sup>. Il apparaît donc que les conditions aux limites en particulier au niveau du ménisque, jouent un rôle très important dans la détermination des fréquences de résonance. L'agilité en fréquence du dispositif vibrant apparaît donc très importante. Les déterminations théoriques permettant de connaître les deux bornes extrêmes du domaine fréquentiel. Il conviendra de continuer ces recherches et des les étoffer en particulier par une recherche et une cartographie de tous les modes.

<sup>①</sup>La seringue est traitée à l'aide d'un produit spécial pour permettre à la solution injectée de glisser sur les bords

## 7.5 Le système de détection

### 7.5.1 Expérimentations sur un tube cylindrique

Le système de détection des ondes de Faraday a été testé tout d'abord sur le modèle simplifié c'est-à-dire le tube rempli d'eau mis en vibrations par un pot vibrant et soumis à une mesure au travers d'un RADAR. Les résultats obtenus sont plutôt probants, on remarque un léger décalage de la fréquence vers les fréquences plus basses (la meilleure observation est obtenue aux alentours de 120 Hz au lieu de 128 Hz). Les spectres de mesure obtenus sont données par la figure 7.10. Une photographie de l'onde de surface résultante est donnée par la figure 7.9. On remarque en plus de la sous-harmonique  $1/2$  la présence d'une sous harmonique  $1/4$  et  $3/4$ .



FIG. 7.9: Photographie du modèle expérimental en présence de sous-harmoniques.

### 7.5.2 Expérimentation sur un modèle avec du carbone

Cette expérimentation correspond à ce que les industriels appellent la maquette de laboratoire. Cette maquette a été décrite sur la figure 5.10. L'eau est insérée dans le composite à l'aide d'une seringue et le trou est délicatement rebouché. La surface est alors excitée par un vibreur percutant, et un capteur balaye la surface en vue de la détecter. Les résultats de mesures sont donnés sur la figure 7.11. Bien que la mesure soit bruitée à cause du carbone, les résultats de mesure sont très intéressants et ont donné lieu à un contrat pour une action de recherche avec un industriel. Un transfert de licences est d'ailleurs, en cours de négociation.

On peut remarquer que les résultats de la mesure en particulier les fréquences de résonances sont différentes du modèle simplifié. Ce décalage peut être expliqué de la façon suivante :

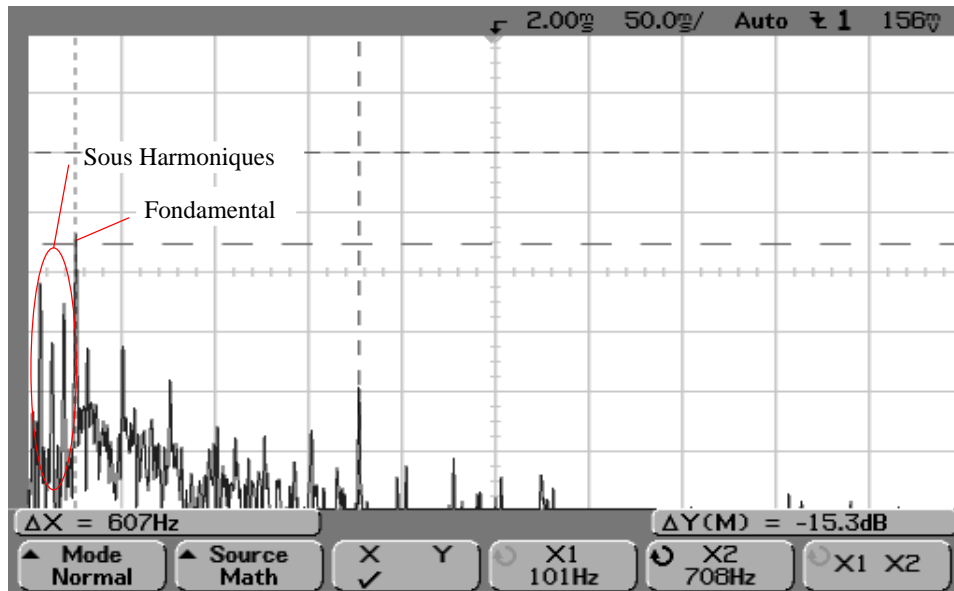
- Les cellules sont hexagonales ce qui provoque un changement des fréquences propres.
- Le fluide eau est pollué par des résidus de fabrication restés prisonnier des cellules. Les cellules sont en particulier recouvertes d'une sorte de matière huileuse lors de la fabrication. Ce résidu diminue la tension de surface et donc la fréquence propre.
- La taille des cellules est légèrement plus grande que dans le modèle idéal.

### 7.5.3 Conclusion et perspectives

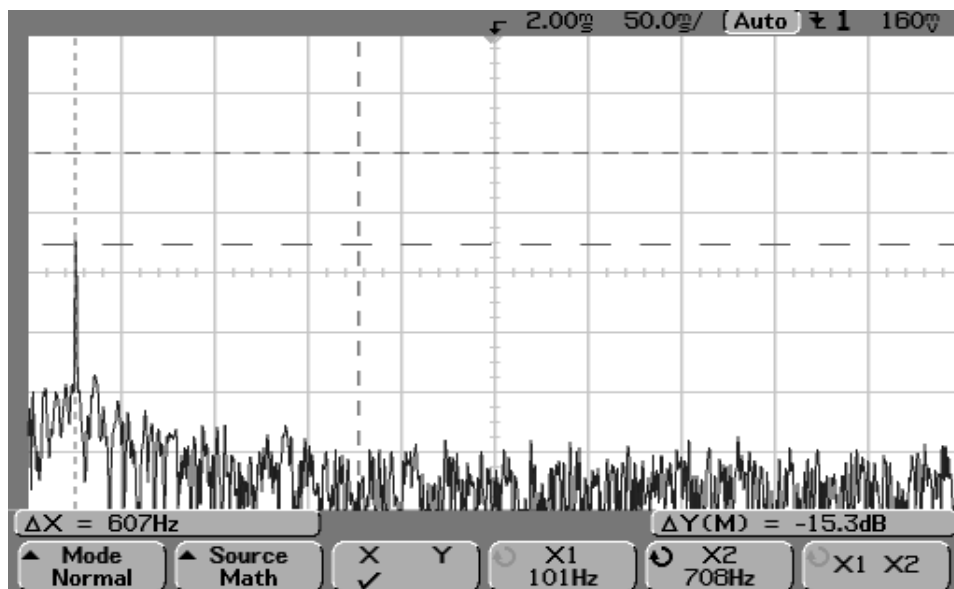
La méthode basée sur la détection de sous-harmoniques est bien capable de détecter la présence d'eau dans le cas réel c'est à dire à l'intérieur du composite. Les résultats même bruts sont très satisfaisants avec entre le témoin et le cas où l'eau est présente une différence de 10 dB.

L'amélioration de la mesure peut être effectuée dans trois directions :

- Un filtrage analogique du fondamental afin d'augmenter la dynamique de notre dispositif.
- Un traitement du signal plus poussé permettant d'améliorer le rapport signal à bruit.



(a) En présence d'eau



(b) Témoin

FIG. 7.10: Spectres obtenus lors de la mesure du modèle simplifié. On remarque la présence de sous harmoniques en présence d'eau.

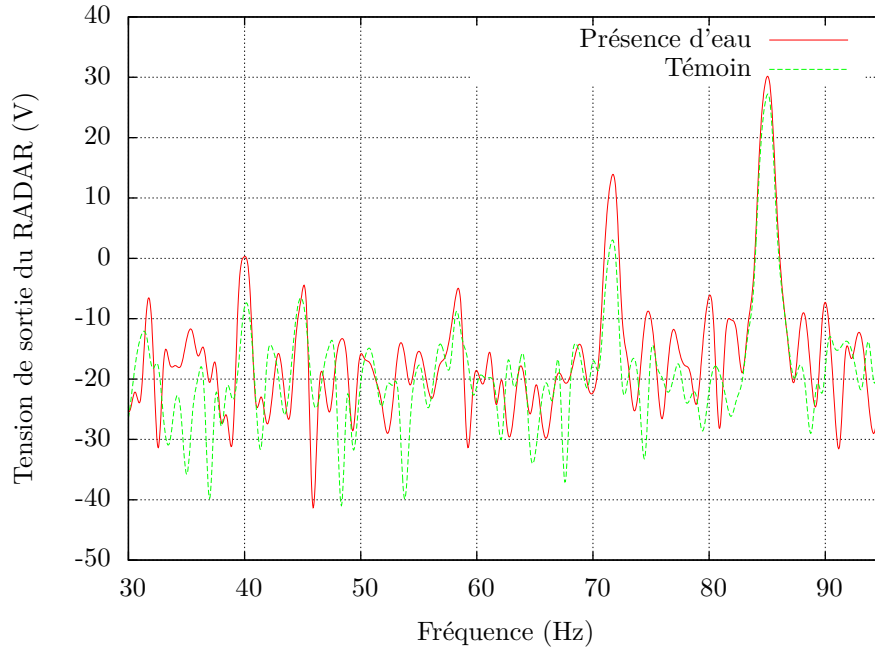


FIG. 7.11: Spectres obtenus lors de la mesure sur la maquette de laboratoire. L'excitation se situe à 83 Hz, on remarque alors l'augmentation de 10 dB de la sous-harmonique au environ de 40 Hz.

- La mise en place d'un système d'évaluation de la mesure permettant de donner le résultat de la mesure sous forme binaire : présence ou absence d'eau.

## 7.6 Conclusion

Cette étude expérimentale a permis de lever les doutes sur la faisabilité de notre dispositif de détection. L'étude sur les ondes de Faraday bien que permettant de vérifier certains aspect de nos codes de calcul nécessite d'être étoffée. En particulier il conviendra d'effectuer des mesures pour différents fluides, et surtout de déterminer expérimentalement les domaines de stabilité. Ce programme ambitieux s'inscrit dans un programme de recherche plus long et nécessitera sans doute une collaboration plus poussée avec des laboratoires de mécanique des fluides.

La maquette de laboratoire donne des résultats satisfaisants au niveau de composites réels de type aviation. Il conviendra de confirmer ces bons résultats en comparant en particulier notre méthodes aux méthodes existantes. Une étude statistique devra être aussi menée afin de déterminer les taux de faux positifs/faux négatifs et ainsi d'évaluer la fiabilité et la susceptibilité de notre dispositif.





**Troisième partie**

**Conclusion et Annexes**



## Chapitre 8

# Conclusion

Dans le cadre de ce travail quatre nouvelles méthodes de contrôle non destructif des composites carbonés ont été mise au point. Les trois premières méthodes, faisant appel à une approche purement électromagnétique, sont aptes à détecter les impacts sur des composites. La quatrième méthode basée sur la détection d'une non linéarité très particulière est capable de détecter l'eau dans les cellules du composite. Bien que cette dernière méthode soit encore au stade de maquette de laboratoire, un accord de licence de brevet est en cours avec une filiale d'EADS.

Les recherches sur ces dispositifs sont néanmoins loin d'être closes. En particulier, dans le cadre des trois premières méthodes il conviendra de mener une étude statistique afin de les valider à grande échelle et sur divers types de composites. Dans le cadre des recherches sur les ondes de Faraday, il conviendra d'approfondir notre connaissance sur les ondes de Faraday et en particulier les domaines de stabilité théoriques et expérimentaux en raffinant les méthodes que nous avons utilisées. Enfin notre dispositif multiphysique nécessite d'être industrialisé. En particulier il est nécessaire de le miniaturiser et de l'intégrer.



## Annexe A

# Harmoniques cylindriques

Les harmoniques cylindriques respectant les conditions aux limites de notre problème, sont données par la formule suivante :

$$G_{mns}(r, \theta) = \begin{cases} \cos(m\theta)J_m(r) & \text{si } s = 0 \\ \sin(m\theta)J_m(r) & \text{si } s = 1 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Les conditions au limites faut intervenir le nombre d'onde  $k_{mn}$  solution de :

$$\left. \frac{dJ_m(\frac{k_{mn}r}{R})}{dr} \right|_{r=R} = 0 \quad (\text{A.2})$$

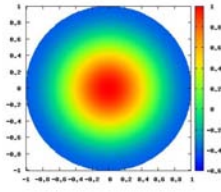
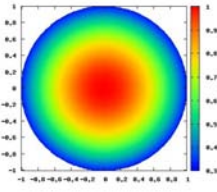
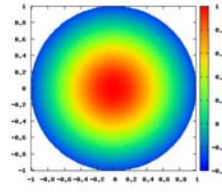
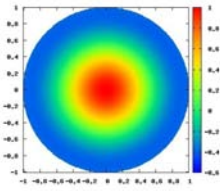
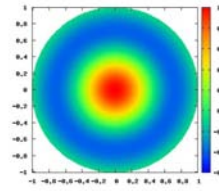
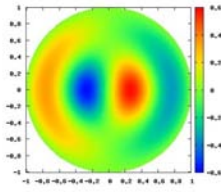
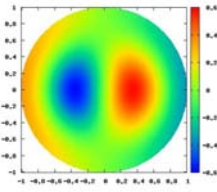
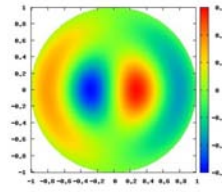
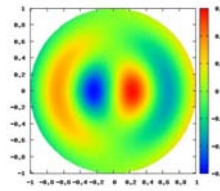
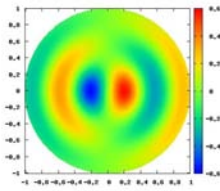
Avec  $R$  le rayon du cylindre. On en déduit donc que  $k_{mn} = \xi_{mn}/R$  Avec  $\xi_{mn}$  les solutions de l'équation :

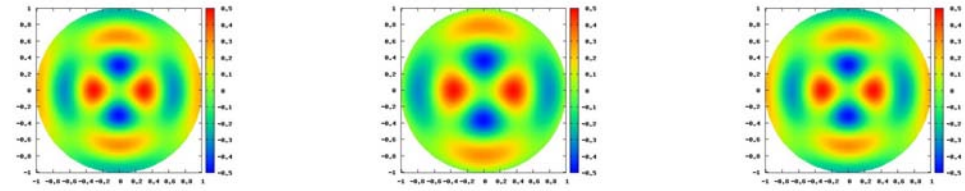
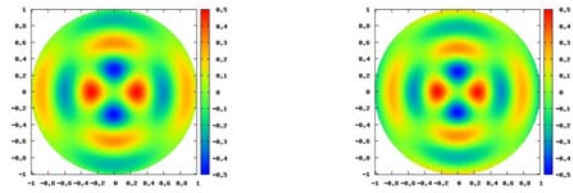
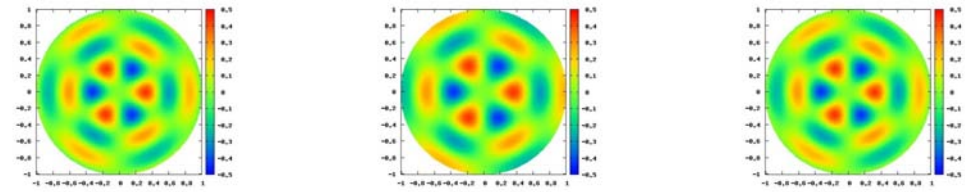
$$J'_m(\xi_{mn}) = 0. \quad (\text{A.3})$$

Les premiers zeros des fonctions de Bessels sont données dans les tables A.1 et A.2. Les harmoniques c'est à dire les fonction  $G_{mns}(k_{mn}r, \theta)$  sont représenté sur les figures suivantes.

	0	1	2	3	4	5
0	3.8317	1.8412	3.0542	4.2012	5.3175	6.4156
1	7.0156	5.3314	6.7061	8.0152	9.2824	10.5199
2	10.1735	8.5363	9.9695	11.3459	12.6819	13.9872
3	13.3237	11.7060	13.1704	14.5858	15.9641	17.3128
4	16.4706	14.8636	16.3475	17.7887	19.1960	20.5755

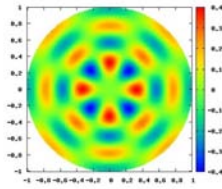
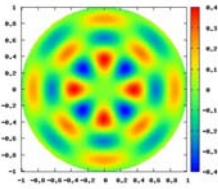
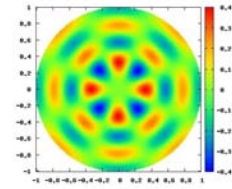
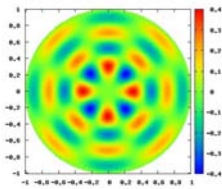
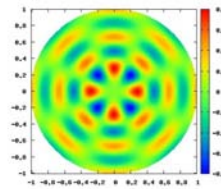
TAB. A.1: Tables des premiers zeros de  $J'_m$ .

(a)  $m = 0, n = 0, s = 0$ (b)  $m = 0, n = 1, s = 0$ (c)  $m = 0, n = 2, s = 0$ (d)  $m = 0, n = 3, s = 0$ (e)  $m = 0, n = 4, s = 0$ FIG. A.1: Harmoniques cylindriques ( $m = 0$ )(a)  $m = 1, n = 0, s = 0$ (b)  $m = 1, n = 1, s = 0$ (c)  $m = 1, n = 2, s = 0$ (d)  $m = 1, n = 3, s = 0$ (e)  $m = 1, n = 4, s = 0$ FIG. A.2: Harmoniques cylindriques ( $m = 1$ )

(a)  $m = 2, n = 0, s = 0$ (b)  $m = 2, n = 1, s = 0$ (c)  $m = 2, n = 2, s = 0$ (d)  $m = 2, n = 3, s = 0$ (e)  $m = 2, n = 4, s = 0$ FIG. A.3: Harmoniques cylindriques ( $m = 2$ )(a)  $m = 3, n = 0, s = 0$ (b)  $m = 3, n = 1, s = 0$ (c)  $m = 3, n = 2, s = 0$ (d)  $m = 3, n = 3, s = 0$ (e)  $m = 3, n = 4, s = 0$ FIG. A.4: Harmoniques cylindriques ( $m = 3$ )



$\ell$	0	1	2	3	4
$(m, n)$	(1, 0)	(2, 0)	(0, 0)	(3, 0)	(4, 0)
$k_{mn}$	1.8412	3.0542	3.8317	4.2012	5.3175
$\ell$	5	6	7	8	9
$(m, n)$	(1, 1)	(5, 0)	(2, 1)	(0, 1)	(6, 0)
$k_{mn}$	5.331	6.416	6.706	7.016	7.501
$\ell$	10	11	12	13	14
$(m, n)$	(3, 1)	(1, 2)	(7, 0)	(4, 1)	(8, 0)
$k_{mn}$	8.015	8.536	7.501	9.282	9.647
$\ell$	15	16	17	18	19
$(m, n)$	(2, 2)	(0, 2)	(5, 1)	(9, 0)	(3, 2)
$k_{mn}$	9.970	10.174	10.520	10.711	11.346

TAB. A.2: Tables des  $\ell$  premiers zeros de  $J'_m$  classé par ordre croissant independement de l'ordre.(a)  $m = 4, n = 0, s = 0$ (b)  $m = 4, n = 1, s = 0$ (c)  $m = 4, n = 2, s = 0$ (d)  $m = 4, n = 3, s = 0$ (e)  $m = 4, n = 4, s = 0$ FIG. A.5: Harmoniques cylindriques ( $m = 4$ )

## Annexe B

# L'impacteur

Cette section regroupe les plans de l'impacteur pour les essais d'anistropie (plan global sur la figure B.2, plans détaillés sur les figures B.3 à B.7). Une photographie du dispositif final est disponible sur la figure B.1.

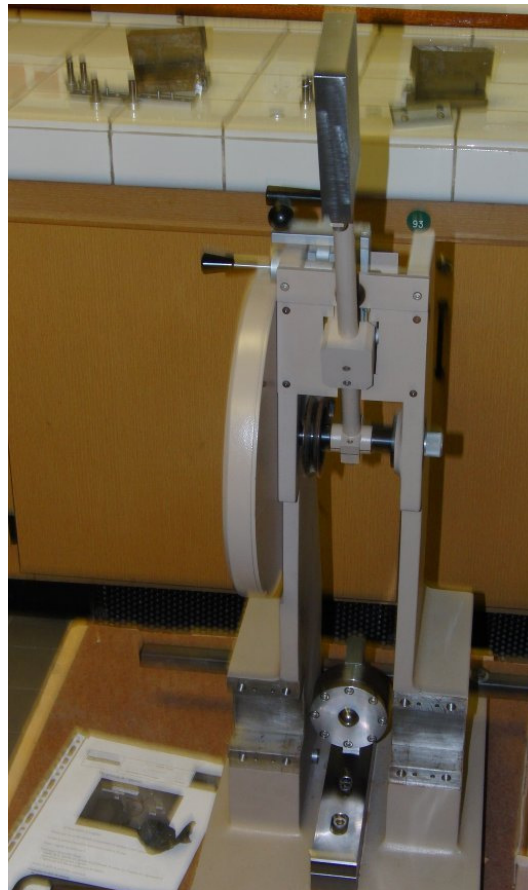


FIG. B.1: Photographie de l'impacteur.

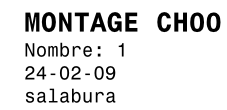


FIG. B.2: Plan global de l'impacteur.

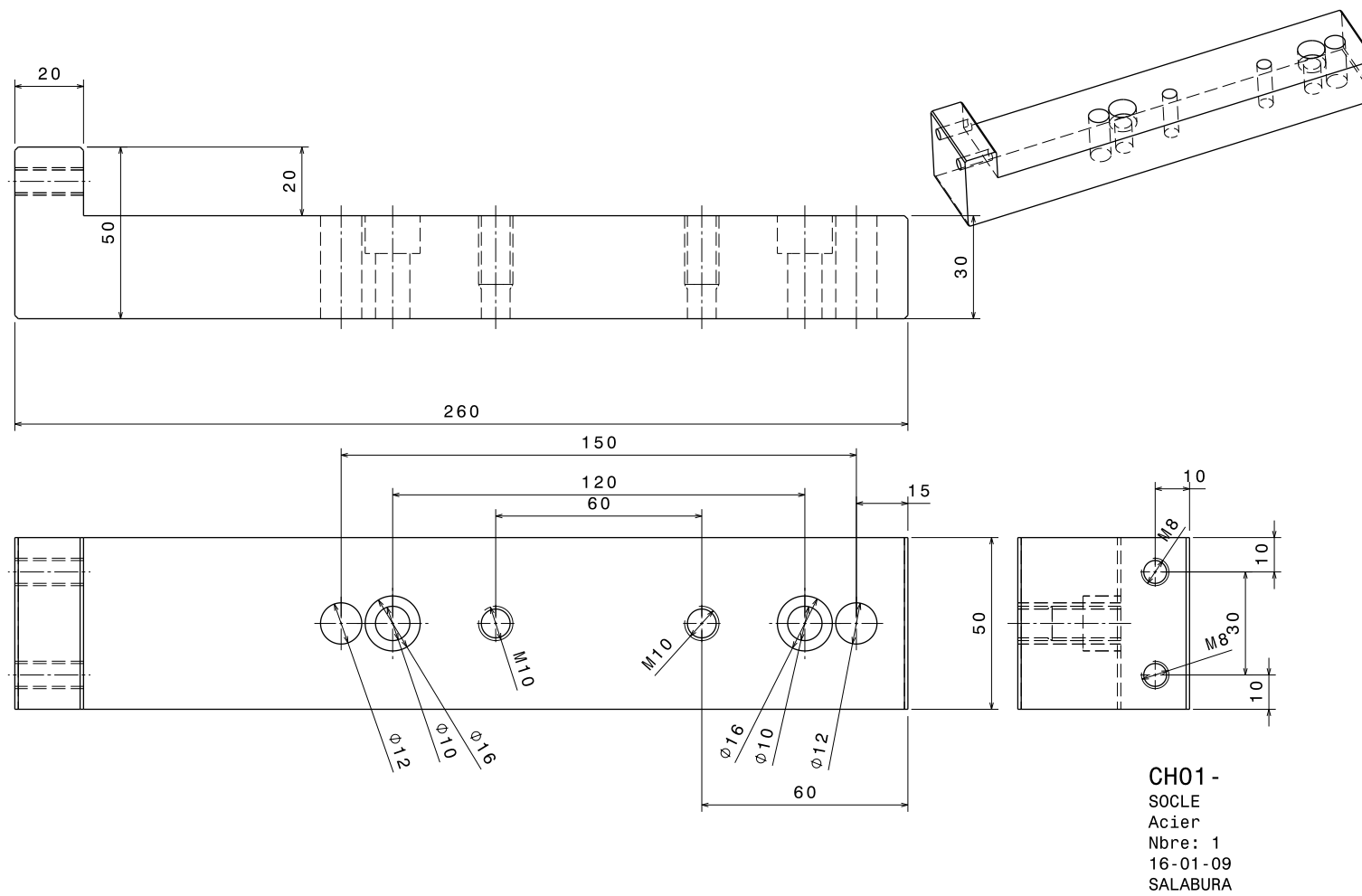


FIG. B.3: Plan de la pièce d'adaptation CH01.

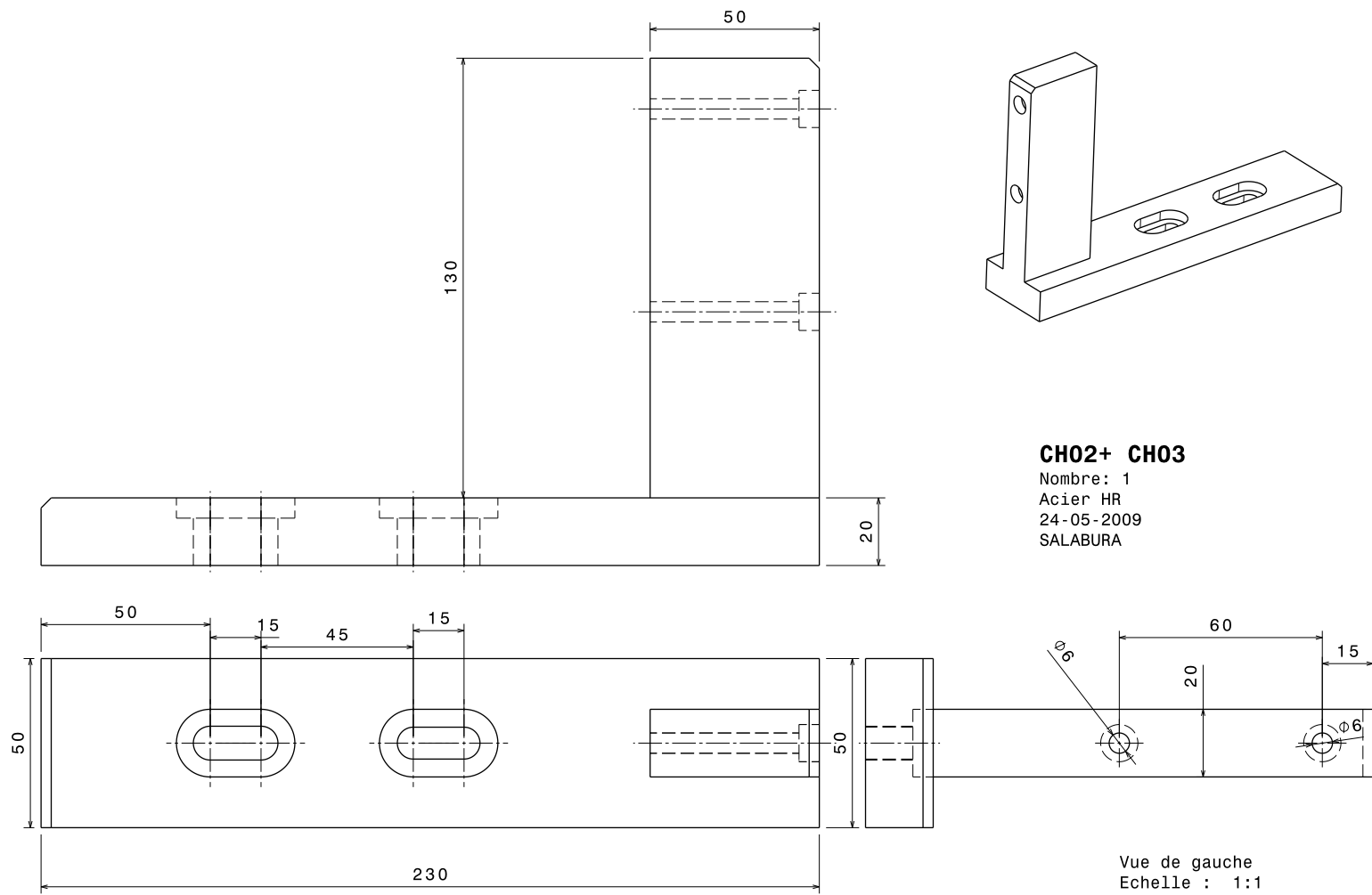


FIG. B.4: Plan de la pièce de support CH02 et CH03.

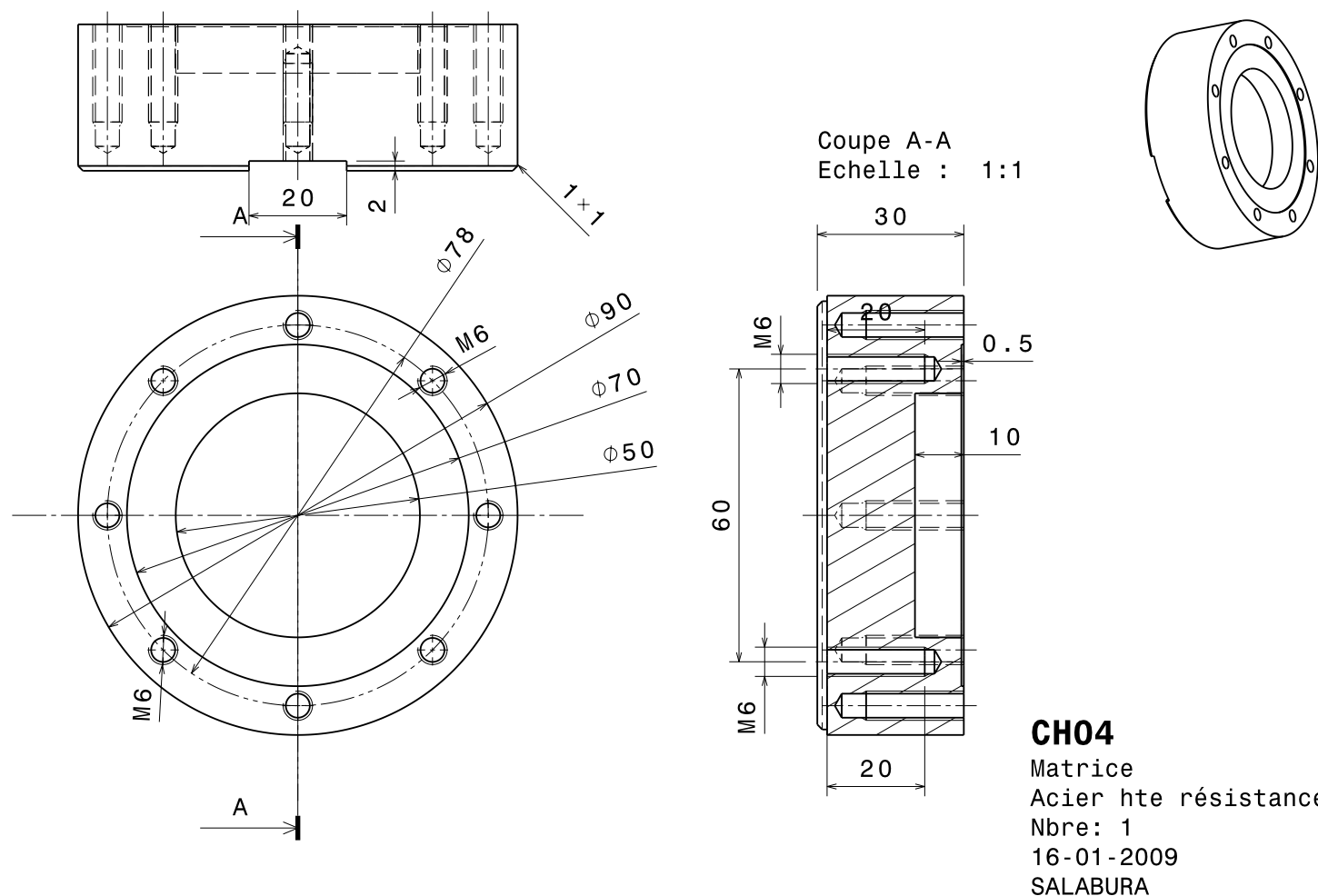
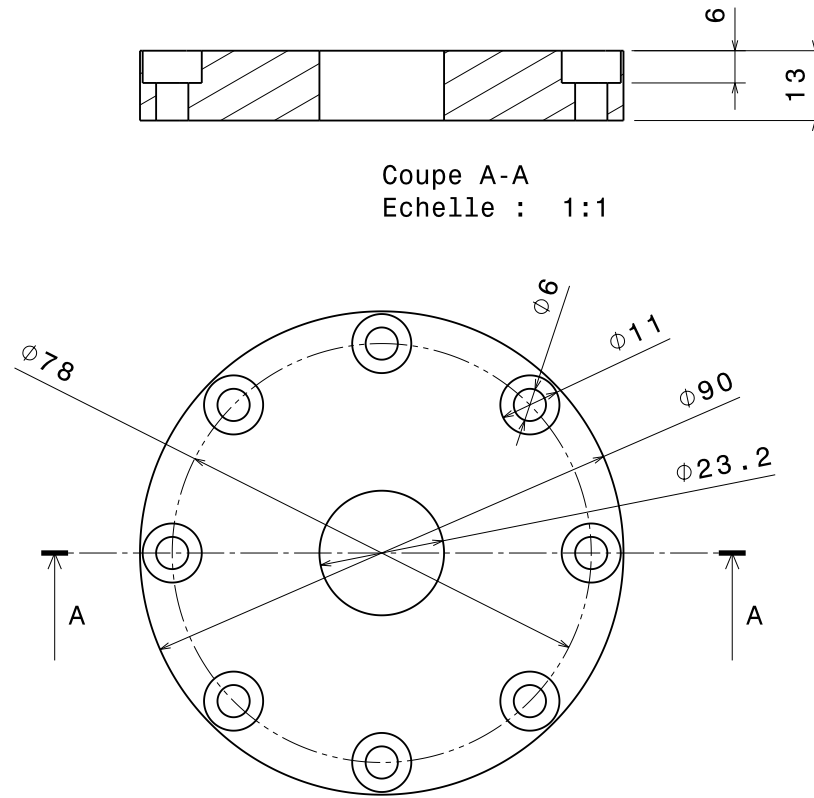
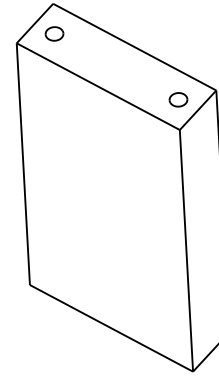
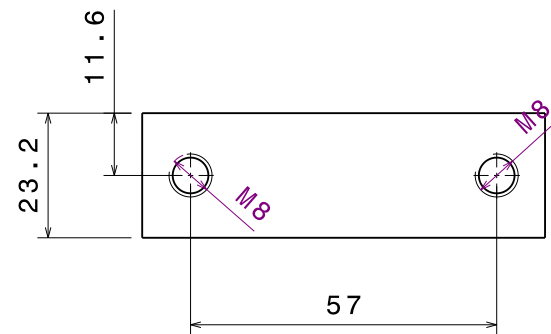
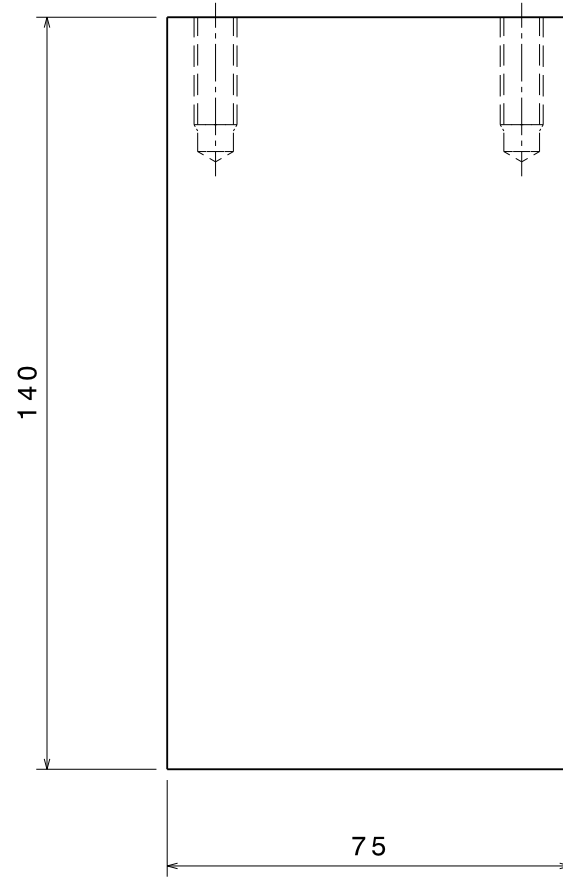


FIG. B.5: Plan de la pièce de maintien CH4.



Guide bille  
 Nbre: 1  
 Acier  
 SALABURA  
 19-01-09

FIG. B.6: Plan de la pièce de guidage de la bille.



Masselotte  
 Nbre 1  
 Acier  
 Poids= 1.913 kg  
 SALABURA  
 16-01-09





## Annexe C

# Calculs associés au problème hydraulique

### C.1 Calcul des expressions intervenant dans le problème aux valeurs propres la ligne triple étant fixe

La condition d'absence de tension latérale fait intervenir les coefficients :

$$\beta_n^1(r) = \begin{pmatrix} [(\eta'_x(r) - 1)(k_n p_n^1(r) + p_n^{3'}(r))] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \\ + 2\eta'_s [p_n^{1'}(r) - k_n p_3(r)] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \end{pmatrix} \quad (C.1)$$

$$\gamma_n^1(r) = \begin{pmatrix} [(\eta'_x(r) - 1)(k_n p_n^1(r) + p_n^{3'}(r))] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \\ + 2\eta'_s [p_n^{1'}(r) - k_n p_n^3(r)] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \end{pmatrix} \quad (C.2)$$

La deuxième condition fait intervenir les coefficients :

$$\beta_n^2(r) = \begin{pmatrix} [k_n r p_n^2(r) + m p_n^3(r)] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \\ - \eta'_s [m p_n^1(r) - p_n^2(r) + r p_n^{2'}(r)] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \end{pmatrix} \quad (C.3)$$

$$\gamma_n^2(r) = \begin{pmatrix} [k_n r p_n^2(r) + m p_n^3(r)] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \\ - \eta'_s [m p_n^1(r) - p_n^2(r) + r p_n^{2'}(r)] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \end{pmatrix} \quad (C.4)$$

La condition cinétique se traduit par :

$$\beta_n^3(r) = \eta'_s(r) p_n^1(r) \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} - p_n^3(r) \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \quad (C.5)$$

$$\gamma_n^3(r) = \eta'_s(r) p_n^1(r) \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} - p_n^3(r) \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \quad (C.6)$$

$$\zeta_n^3 = \frac{J_m(\xi_{mn}r)}{|J_{m+1}(\xi_{mn})|} \quad (C.7)$$

La condition à la surface se traduit par :

$$\beta_n^4 = C_n r^2 \sqrt{Re} J_m(k_n r) \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \quad (C.8)$$

$$\gamma_n^4 = C_n r^2 \sqrt{Re} J_m(k_n r) \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \quad (C.9)$$

Et :

$$\beta_n^5 = \frac{2r^2}{\sqrt{Re}} \frac{1}{1 + \eta_s'^2} \left( \begin{aligned} & \left[ k_n p_n^3(r) + \eta_s'^2(r) p_n^{1'}(r) \right] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \\ & - \left[ \eta_s'(r) k_n p_n^1(r) + \eta_s'(r) p_n^{3'}(r) \right] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\cosh(k_n \frac{h}{2})} \end{aligned} \right) \quad (C.10)$$

$$\gamma_n^5 = \frac{2r^2}{\sqrt{Re}} \frac{1}{1 + \eta_s'^2} \left( \begin{aligned} & \left[ k_n p_n^3(r) + \eta_s'^2(r) p_n^{1'}(r) \right] \frac{\sinh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \\ & - \left[ \eta_s'(r) k_n p_n^1(r) + \eta_s'(r) p_n^{3'}(r) \right] \frac{\cosh k_n(z + \frac{h}{2})}{\sinh(k_n \frac{h}{2})} \end{aligned} \right) \quad (C.11)$$

$$\zeta_n^5 = \left( \begin{aligned} & - \frac{\sqrt{Re}}{Bo |J_{m+1}(\xi_{mn})|} \left[ r^2 \frac{\xi_{mn}^2 J_m''(\xi_{mn} r)}{(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} - \frac{m^2 J_m(\xi_{mn} r)}{(1 + \eta_s'^2)^{1/2}} \right. \\ & \quad \left. + r \xi_{mn} J_m'(\xi_{mn} r) \left( \frac{1 + 3\eta_s'^2}{(1 + \eta_s'^2)^{3/2}} - r \frac{3\eta_s' \kappa_s}{1 + \eta_s'^2} \right) \right] \\ & + r^2 \sqrt{Re} \frac{J_m(\xi_{mn} r)}{|J_{m+1}(\xi_{mn})|} \end{aligned} \right) \quad (C.12)$$

La condition de non glissement au fond se traduit par :

$$\beta_n^6(r) = p_n^1(r) \quad \beta_n^7(r) = p_n^2(r) \quad \beta_n^8(r) = -p_n^3(r) \tanh k_n \frac{h}{2} \quad (C.13)$$

$$\gamma_n^6(r) = -p_n^1(r) \quad \gamma_n^7(r) = -p_n^2(r) \quad \gamma_n^8(r) = p_n^3(r) \coth k_n \frac{h}{2} \quad (C.14)$$

## C.2 Calcul des expressions intervenant dans le problème aux valeurs propres condition aux limites glissantes

La condition de glissement au fond s'exprime :

$$\beta_n^6(r) = p_n^1(r) k_n \tanh k_n \frac{h}{2} \quad \beta_n^7(r) = p_n^2(r) k_n \tanh k_n \frac{h}{2} \quad \beta_n^8(r) = -p_n^3(r) \tanh k_n \frac{h}{2} \quad (C.15)$$

$$\gamma_n^6(r) = -p_n^1(r) k_n \coth k_n \frac{h}{2} \quad \gamma_n^7(r) = -p_n^2(r) k_n \coth k_n \frac{h}{2} \quad \gamma_n^8(r) = p_n^3(r) \coth k_n \frac{h}{2} \quad (C.16)$$

## Annexe D

# Publications

### D.1 Bibliographie

- [1] Bastien ROUCARIÈS et al. « Antenna backscattering and application to a cost effective non destructive testing method of carbon composites ». Anglais. Dans : *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. 331.7. Charleston, SC, USA 2009.
- [2] Bastien ROUCARIÈS et Jacques DAVID. « Méthode de caractérisation micro-onde de composites carbone – Application au controle non destructif ». Dans : *10emes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux*. O9-3. Limoge, France 2008.
- [3] Bastien ROUCARIÈS et al. « Procédé et dispositif de détection d'eau dans les structures alvéolaires ». Français. Brev. français FR2917166. 5 juin 2007.
- [4] Bastien ROUCARIÈS et al. « Method and device for detecting water in a cellular structure ». patentwo 2008148740. Institut National Polytechnique de TOULOUSE. 2008.

**Titre :** Contributions au contrôle non destructif des composites carbonés

**Auteur :** Bastien ROUCARIÈS

**Mots Clefs :** NDT, composites, ondes de Faraday, RF, Backscattering, anisotropie

**Résumé :** La recherche de défauts dans les matériaux est un sujet complexe et important, en particulier lorsque la sécurité est en jeu comme dans le domaine aéronautique. Cette thèse s'inscrit dans cette problématique et s'organise en deux parties.

La première partie est dédiée à la détection des défauts dans les composites carbonés par trois nouvelles méthodes radiofréquences permettant de détecter, en particulier, les impacts sur les peaux des composites carbonés. La deuxième partie est consacrée à la détection des infiltrations d'eau dans les composites alvéolaires par une méthode multiphysique couplant une onde hydraulique non linéaire et une détection par un RADAR CW.

**Title :** Contributions to the non destructive control of carbon composites

**Author :** Bastien ROUCARIÈS

**Keywords :** NDT, composites, Faraday's wave, RF, Backscattering, anisotropy

**Abstract :** Detecting default inside material is a complex and important topic, particularly when the safety is at risk like for instance in the aeronautic field. This phd thesis is divided in two parts.

In a first part, mainly we will present three new RF methods allowing to detect, for example, impact damages on carbon composite skins. In a second part we will present a new method aimed to detect water ingress in cellular composite. This new method is based on the interaction of a non-linear water wave with a RADAR.